

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Фізико-механічного інституту
ім. Г.В. Карпенка НАН України

академік НАН України  Зіновій НАЗАРЧУК

«  » 2024 р.

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів докторської дисертації «Наукові основи підвищення роботоздатності металів IV групи (Ti, Zr, Hf) та їх сплавів дифузійним насиченням елементами втілення (O, N, C)» (у вигляді кваліфікаційної наукової праці) старшого наукового співробітника відділу матеріалознавчих основ інженерії поверхні Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, кандидата технічних наук, старшого дослідника ТРУША Василя Степановича представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство

Рішенням Вченої ради Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України призначенні рецензенти, а саме:

- **ЗАВАЛІЙ Ігор Юліанович**, завідувач відділу водневих технологій та матеріалів альтернативної енергетики, Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, академік НАН України, доктор хімічних наук, професор;
- **СТУДЕНТ Олександра Зиновіївна**, провідний науковий співробітник відділу діагностики корозійно-водневої деградації матеріалів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, доктор технічних наук, професор;
- **БАЛИЦЬКИЙ Олександр Іванович**, провідний науковий співробітник відділу міцності матеріалів і конструкцій у водневовмісних середовищах Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, доктор технічних наук, професор,

розглянувши докторську дисертацію ТРУША Василя Степановича «Наукові основи підвищення роботоздатності металів IV групи (Ti, Zr, Hf) та їх сплавів дифузійним насиченням елементами втілення (O, N, C)» (тему дисертації затверджено на засіданні Вченої ради Фізико-механічного інституту

ім. Г.В. Карпенка НАН України «21» жовтня 2021 р., протокол № 10), наукові публікації, в яких висвітлено основні наукові результати, а також за результатами обговорення дисертаційної роботи у повному обсязі на науково-кваліфікаційному семінарі «Проблеми матеріалознавства та інженерії поверхні металів» Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України (протокол №2 від 28 червня 2024 р.), рецензенти підготували висновок про наукову новизну, теоретичне і практичне значення результатів, представлених у докторській дисертації:

1. Дисертація ТРУША Василя Степановича, представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство, є кваліфікаційною науковою працею, яка відповідає принципам академічної добродетелі, підготовлена здобувачем самостійно з послідовним викладом отриманих результатів та формулюванням відповідних висновків. За обсягом, актуальністю, науковою новизною та практичною цінністю робота відповідає вимогам п. 7, 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 1197 від 17 листопада 2021 року.

2. Актуальність теми дослідження

Використання тонкостінних елементів конструкцій з металів IV групи (титану, цирконію, гафнію) та їх сплавів є однією з необхідних передумов розвитку високотехнологічних галузей (авіація, атомна енергетика тощо). Важливим чинником підвищення їх роботоздатності за дії тривалих цикліческих та статичних навантажень в елементах відповідального обладнання є структурно-фазовий стан цих матеріалів. Причому це особливо важливо стосовно характеристик їх поверхневих шарів, що передбачає удосконалення відомих методів їх зміцнення або розроблення нових.

Інженерія поверхні є ефективним шляхом розширення спектру функціональних властивостей матеріалів. Модифікують поверхневі шари шляхом нанесення покриттів або хіміко-термічним обробленням (ХТО). Враховуючи, що Ti, Zr, Hf мають високу спорідненість до елементів втілення (кисню, азоту, вуглецю), ХТО вважають одним з ефективних методів керування структурою та характеристиками їх поверхневих шарів. Значний внесок у вирішенні проблем модифікації різних матеріалів зробили S. Malinov, C. Anghel, В.М. Федірко, В.М. Ажажа, В.М. Воєводін, К.В. Ковтун, Т.П. Черняєва, C. Lemaignan, S. Yamanaka, M. Reif, K. Takahashi, L. Pazos, D. Lee та ін. Проте стосовно сплавів на основі Ti, Zr, Hf дотепер увагу приділяли в основному вивченю впливу об'ємного насичення елементами втілення на їх властивості. Поверхневе модифікування для цих сплавів застосовували в основному для підвищення трибологічних та антикорозійних властивостей. На сьогодні невідомі кореляційні залежності між їх властивостями після модифікування поверхневих шарів та довговічністю за-

різних умов навантаження. Окрім цього, їх експлуатація у виробничих умовах не виключає впливу водню, що також істотно впливатиме на їх роботоздатність.

Таким чином, розроблення методології підвищення довговічності сплавів на основі титану, цирконію, гафнію за дії тривалих циклічних та статичних навантажень та зниження схильності до поглинання водню шляхом використання такого ефективного методу інженерії поверхні як їх поверхневе дифузійне насичення киснем, азотом, вуглецем залишається актуальною і важливою науково-технічною проблемою сучасного матеріалознавства, вирішення якої розширить спектр застосування тонкостінних елементів з цих сплавів у багатьох виробничих процесах і відповідальних конструкціях.

3. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота спочатку виконувалась у відділі високотемпературної міцності конструкційних матеріалів у рідкометалевих і газових середовищах, а після реорганізації відділів продовжувалась у відділі матеріалознавчих основ інженерії поверхні Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України. Представлені в роботі результати були отримані в рамках різних тем, зокрема: за відомчим замовленням НАН України «Фізико-хімічні основи підвищення циклічної та статичної міцності виробів із титанових сплавів градієнтним зміщенням поверхневих шарів металу елементами втілення (O, N, C) за термодифузійного насичення» (№ держреєстрації 0112U002790, 2012-2014 pp.), «Підвищення ресурсу виробів з цирконієвих сплавів градієнтним твердорозчинним зміщенням приповерхневого шару металу» (№ держреєстрації 0113U004219, 2013 р, № держреєстрації 0114U000815, 2014 р., № держреєстрації 0115U004011, 2015 р.), за цільовою комплексною програмою наукових досліджень НАН України «Ресурс», проект «Розробка фізико-хімічних основ інженерії поверхні цирконієвих сплавів у контролюваних газових середовищах та методів оцінки ресурсу виробів активної зони» (№ держреєстрації 0116U006341, 2016 р., № держреєстрації 0117U000721, 2017 р., № держреєстрації 0118U000475, 2018 р., № держреєстрації 0119U101186, 2019 р., 2020 р.) та за цільовою комплексною програмою наукових досліджень НАН України «Ресурс-2», за грантами НАН України на 2011-2012 рр. для молодих учених НАН України «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, за проектом «Розробка технологічних процесів підвищення функціональних властивостей та ресурсу сучасних та перспективних оболонкових матеріалів тепловидільних елементів шляхом оброблення у контролюваних кисень-азотовмісних середовищах» (№ держреєстрації 0121U110372, 2021 р.) цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Ресурс-3», в якому

автор був співкерівником. Крім того, Труш В. С. був відповідальним виконавцем теми за відомчим замовленням 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.).

4. Особистий внесок здобувача в одержання наукових результатів
В дисертаційній роботі постановка і обґрунтування завдань досліджень, узагальнення результатів експериментальних досліджень, формулювання положень наукової новизни та висновків здійснено автором самостійно. Структура та обсяг дисертаційної роботи обговорювались спільно з науковим консультантом доктором технічних наук, професором І. М. Погрелюком. У публікаціях, написаних у співавторстві, В. С. Трушу належать: встановлення кінетичних закономірностей високотемпературної взаємодії титанових, цирконієвих сплавів та гафнію з киснем, азотом, вуглецем; виявлення еволюції дислокаційної структури титану після дифузійного насичення азотом та вуглецем; дослідження впливу дифузійного насичення киснем та азотом на жаротривкість цирконію; встановлення закономірностей впливу оброблення титану, цирконію і їх сплавів та гафнію у кисне-, азото- та вуглецевмісних газових середовищах на їх довговічність за втомних та тривалих статичних навантажень; визначення алгоритму дифузійного насичення титанових сплавів киснем для досягнення регламентованих рівнів міцності їх поверхневих шарів; встановлення ролі структури титану та гафнію у вихідному стані на їх здатність насичуватися азотом або киснем та на отримані властивості відповідно; акустичні характеристики насиченого киснем та азотом цирконію; оцінювання впливу насичення воднем цирконію, модифікованого киснем та азотом, на його фізико-механічні властивості.

5. Ступінь використання у дисертації матеріалів і висновків кандидатської дисертації здобувача

У докторській дисертації «Наукові основи підвищення роботоздатності металів IV групи (Ti, Zr, Hf) та їх сплавів дифузійним насиченням елементами втілення (O, N, C)» матеріали кандидатської дисертації «Підвищення ресурсу тонкостінних виробів з а- та псевдо-а-сплавів титану твердорозчинним зміщеннем поверхневого шару» Труша Василя Степановича не використовувались.

6. Ступінь обґрутованості наукових положень і висновків, які сформульовані в дисертації

Представлені в дисертації Труша В. С. наукові положення, висновки та рекомендації є експериментально і теоретично обґрунтованими, достовірними та апробованими. Обґрутованість наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечені застосуванням сучасних методів експериментальних досліджень, забезпеченням необхідної точності вимірювань, статистичним обробленням отриманих експериментальних даних, ілюстраційним супроводом представлених результатів досліджень, забезпеченням та контролем параметрів процесу дифузійного насыщення, відтворюваністю результатів, узгодженістю отриманих аналітичних та експериментальних результатів з описаними у вітчизняній та закордонній літературі.

7. Наукова новизна одержаних результатів

1. *Вперше* встановлено закономірності впливу параметрів (температура, тривалість, парціальний тиск) дифузійного насыщення азотом, киснем та вуглецем поверхневих шарів титану, цирконію та гафнію на 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 насыщення їх поверхневих шарів азотом та вуглецем, яка полягає у формуванні дислокаційної структури впорядкованого типу. На титані BT1-0 показано, що модифікування поверхневого шару азотом на $\Delta HV^{\text{пов.}} = 80\%$ та вуглецем на $\Delta HV^{\text{пов.}} = 90\%$ сприяло формування впорядкованої дислокаційні структури у вигляді або плоских скupчень, або петель відповідно.

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

4. *Вперше* встановлено характеристики поверхневого модифікованого шару ($\Delta HV^{\text{пов.}}$, l) цирконієвого сплаву Zr-1Nb, сформованого дифузійним насыщенням киснем ($\Delta HV^{\text{пов.}} = 60\%$, $l = 30 \text{ мкм}$), азотом ($\Delta HV^{\text{пов.}} = 80\%$, $l = 35 \text{ мкм}$), 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 насыщення воднем позитивний ефект модифікації поверхневого шару на довговічність виробів дещо нівелювався, але все ще зберігався.

8. Практичне значення одержаних результатів

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 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 титану BT1-0 забезпечене за формування шару з $\Delta HV^{\text{пов.}} = 80\%$ та $l = 20 \text{ мкм}$, або $\Delta HV^{\text{пов.}} = 90\%$, $l = 50 \text{ мкм}$ 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.

Оптимізовано параметри технологічного середовища для відпалу тонколистових пластин (~1 мм) гафнієвого сплаву ГФЕ-1 після гарячого вальцовування за їх впливом на показник $\Delta HV^{\text{пов.}}$ та глибину поверхневого шару, модифікованого киснем як елементом втілення та на втомну довговічність за симетричного циклу навантаження чистим згином. Виявлено, що відпал у контролюваному кисневмісному середовищі забезпечив формування дифузійно модифікованого поверхневого шару і підвищив втомну довговічність елементу за чистого згину ($\pm \varepsilon_a = 0,6\%$) порівняно з іншими дослідженями режимами оброблювання.

Розроблено та реалізовано на лабораторному устаткуванні методологію модифікування поверхневого шару цирконієвих трубок зі сплаву Zr-1Nb дифузійним насиченням киснем та азотом, яка забезпечила зменшення кількості поглиненого водню (з 900 до 270 ppm), що досягнуто внаслідок формування поверхневого шару з регламентованими характеристиками ($\Delta HV^{\text{пов.}}$ та l). Використання запропонованих параметрів режиму оброблення, які максимально близькі до фінішного оброблення трубок, знизило ризик їх водневого розтріскування і підвищило довговічність за втомного навантаження.

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”.

9: Повнота викладення матеріалів дисертації в опублікованих наукових працях

Дисертація Труша В.С. містить особисто отримані здобувачем науково обґрунтовані результати, які відповідають постанові Кабінету Міністрів України № 1197 від 17 листопада 2021 року «Деякі питання присудження (позбавлення) наукових ступенів», що затверджує «Порядок присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук».

Основні положення й наукові результати дисертації повністю викладено у 47 опублікованих наукових працях, у тому числі в одній монографії, одному розділі англомовної монографії, 35 статтях 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, причому 17 з них опубліковані у виданнях з індексом Q3, а дві – з Q4, 10 у матеріалах і тезах доповідей міжнародних науково-технічних конференцій. Індекс Гірша автора (h-index) становить 9.

Публікації, в яких опубліковані основні результати дисертації та які відносяться до наукових вітчизняних та закордонних видань

Монографія та розділ в іноземній книзі:

1. Федірко В.М., Погрелюк І.М., Лук'яненко О.Г., Труш В.С. Хіміко-термічна обробка титанових сплавів. Поверхневе твердорозчинне модифікування. – К.: Наукова думка, 2020. – 183 с.

2. Trush V., Fedirko V., Luk'yanenko A. Surface treatment of titanium alloys in oxygen-containing gaseous medium (Chapter 4). – In book: *Titanium Alloys – Novel Aspects of Their Processing* / Editors Motyka M., Ziaja W., Sieniawski J. – London, United Kingdom: Intech Open. –2019. – P. 27–41.

Статті у періодичних виданнях, проіндексованих у наукометричних базах даних Scopus та Web of Sciences:

3. Fedirko V.M., Luk'yanenko A.G., Pohrelyuk I.M., Trush V.S. Increasing the serviceability of products from single-phase titanium alloys by thermochemical treatment. *Materials Performance and Characterization*. 2017. Vol. 6, No 4. P. 642–655.

4. Fedirko V.M., Luk'yanenko O.H., Trush V.S., Stoev P.I., Tykhonovs'kyi M.A. Effect of thermochemical treatment in regulated gas media on the thermal resistance of Zr-1%Nb alloy. *Materials Science*. 2016. Vol. 52, No 2. P. 209–215.

5. Trush V.S., Fedirko V.N., Luk'yanenko A.G., Tikhonovsky M.A., Stoev P.I. Influence of thermochemical treatment on properties of tubes from Zr-1Nb alloy. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2018. Vol. 114, No 2. P. 70–75.

6. Trush V., Maruschak P., Student M., Lavrys S., Luk'yanenko A. Effect of heat treatment in oxygen-containing medium on fatigue life of zirconium alloy. *Strojnický časopis - Journal of Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 72, No 2. P. 211–218.

7. Trush V.S., Stoev P.I., Fedirkо V.N., Voyevodin V.N., Tykhonovskyi M.A., Panov V.A., Lukyanenko A.G. Influence of hydrogen on the properties of oxidized and nitride Zr-1%Nb alloy. *Materials Science*. 2022. Vol. 57, No 4. P. 520–526.
8. Trush V.S., Pylypenko N.N., Stoev P.I., Tikhonovsky M.A., Pohrelyuk I.M., Fedirkо V.M., Luk'yanenko A.G., Lavrys S.M. Influence of interstitial elements (oxygen, nitrogen) on properties of zirconium alloys. *Physics and Chemistry of Solid State. Section: Physics*. 2022. Vol. 23, No 2. P. 401–415.
9. Trush V.S., Fedirkо V.M., Luk'yanenko O.H., Kovtun K.V. Optimization of the medium of thermal treatment of GFE-1 hafnium alloy. *Materials Science*. 2017. Vol. 53, No 2. P. 194–199.
10. Trush V.S., Pohrelyuk I.M., Luk'yanenko O.H., Lavrys S.M., Kravchyshyn T.M. Oxygen diffusion saturation of hafnium with the different surface layer. *Nuclear Physics and Atomic Energy*. 2023. Vol. 24, No 2. P. 122–130.
11. Trush V.S., Pohrelyuk I.M., Luk'yanenko O.G., Kravchyshyn T.M., Fedirkо V.M. Influence of heating modes on heat-resistance of Zr and Zr-1%Nb alloy. *Materials Science*, 2023. Vol. 59, No. 2, P. 138–144.
12. Trush V. Effect oxidation and nitriding on the properties of zirconium alloys. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 86, No 2/11, P. 34–42.
13. Trush V.S., Stoev P.I., Luk'yanenko A.G., Voyevodin, V.M. Pohrelyuk I.M., Fedirkо V.M., Kovtun K.V, Kravchyshyn T.M. Influence of oxidation on the properties of near-surface layers of metals from group IV (Ti, Zr and Hf). *Materials Science*, 2022, Vol. 57, No 5. P. 649–655.
14. Trush V.S., Pylypenko N.N., Stoev P.I., Lavrys S.M., Kravchyshyn T.M., Luk'yanenko O.H., Tikhonovsky M.A. Mechanical and acoustic characteristic of oxidized, nitrided and oxybitrided Zr-1%Nb zirconium alloy *Problems of Atomic Science and Technology*. 2022, Vol. 140. No 4, P. 55–60.
15. Trush V.S., Ponrelyuk I.M., Kravchishin T.M., Luk'yanenko A.G., Stoev P.I., Fedirkо V.M., Kovalchuk I.V. Kinetic characteristics of nitriding of Zr-1%Nb alloy. *Materials Science*, 2022, Vol. 58, No 3. P. 408–416.
16. Trush V.S., Lukyanenko O.H., Voyevodin V. M., Stoyev P.I. Influence of heat treatment in gas mediums on mechanical properties of samples of Zr-1%Nb alloy. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 2019. Vol. 41, No 2. P. 227–240.
17. Trush V.S., Luk'yanenko O.H., Stoev P.I. Influence of modification of the surface layer by penetrating impurities on the long-term strength of Zr-1%Nb alloy. *Materials Science*. 2020. Vol. 55, No 4. P. 585–589.
18. Trush V.S., Voyevodin V.N., Stoev P.I., Fedirkо V.N., Luk'yanenko A.G., Panov V.A., Tikhonovsky M.A. Properties of hydrogen saturated Zr-1%Nb alloy after thermochemical treatment. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2021. Vol. 135, No 5. P. 84–87.
19. Voyevodin V.M., Fedirkо V.M., Trush V.S., Luk'yanenko O.H., Stoev P.I., Panov V.A., Tykhonovsky M.A. Influence of thermochemical treatment on the

oxidation of fuel cladding tubes made of Zr-1%Nb alloy. *Materials Science*. 2021. Vol.56, No 4. P. 509–515.

20. Trush V.S., Fedirkо V.M., Voyevodin V.M., Luk'yanenko A.G., Stoev P.I., Panov V.A. Influence of the functional layer on the operating characteristics of Zr-1%Nb alloy at a temperature of 380°C. *Materials Science*. 2022. Vol. 57, No 2. P. 234–239.

21. Trush V.S., Stoev P.I., A.G. Luk'yanenko, Pohrelyuk I.M., Fedirkо V.M., Pylypenko M.M., Kravchyshyn T.M. Influence of deformation on the hydrogen saturation of Zr-1%Nb alloy after oxidation and nitriding. *Materials Science*. 2022. Vol. 58, No 1. P. 61–66.

*Статті у наукових виданнях,
включених до Переліку наукових фахових видань України:*

22. Trush V., Luk'yanenko A., Fedirkо V. Study of titanium oxidation kinetics at temperature above polymorphic transformation. *Technology Audit and Production Reserves*. 2021. No 4 (1(60)). P. 37–41.

23. Федірко В.М., Труш В.С., Лук'яненко О.Г., Погрелюк І.М. Вплив змінених елементами втілення приповерхневих шарів на механічні властивості сплавів титану. *Сучасна електрометалургія*. 2019. № 4, С. 32–37.

24. Лук'яненко О.Г., Труш В.С. Інженерія поверхні цирконієвого сплаву Zr-1%Nb. *Наукові нотатки*. 2015. Вип. 49. С. 97–101.

25. Лук'яненко О.Г., Труш В.С., Федірко В.М. Кінетика навуглекислотворення титанових сплавів при термодифузійному насиченні з газового середовища. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2018. № 2 (81). С.57–62.

26. Труш В.С., Лук'яненко О.Г. Вплив зміщеного елементами втілення (O, C) приповерхневого шару на опір руйнуванню титану за втомного та ударного навантажень. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2020. № 3 (90). С. 73–79.

27. Trush V.S. Kinetic regularities of high-temperature interaction of titanium alloys with an oxygen-medium. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. 2018. Vol. 4, No. 2. P. 1–13.

28. Погрелюк І.М., Труш В.С., Лук'яненко О.Г. До питання про концепцію інженерії поверхні титанових сплавів в контролюваних газових середовищах *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорти*. 2020. Вип. 1 (14), С.119–123.

29. Trush V., Luk'yanenko A. Kinetics of high-temperature interaction of titanium alloys with a carbon-containing gaseous medium. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. 2018. Vol. 4, No 1. P. 29–39.

30. Труш В.С. Вплив швидкості нагріву та часу витримки на кінетику термодифузійного насичення цирконієвих сплавів киснем. *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні*. 2018. Вип. 52. С. 103–113.

31. Voyevodin V.N., Trush V.S., Fedirkо V.N., Luk'yanenko A.G., Stoев P.I., Tikhonovsky M.A. Increasing long-term strength of Zr-1%Nb alloy by diffusive hardening near-surface layer: *Праці Одеського політехнічного університету*. 2018. Вип. 2 (55). С. 59–65.

32. Труш В.С., Погрелюк І.М., Лук'яненко О.Г. Вплив дифузійного навуглечування приповерхневого шару на збільшення втомної довговічності титану та його сплавів. *Наукові вісті КПІ*. 2021. № 3 (133). С. 40–46.

33. Погрелюк І.М., Труш В.С., Лук'яненко О.Г. Вплив обробки в азотовмісному газовому середовищі на характеристики приповерхневих шарів титанових сплавів. *Вісник українського матеріалознавчого товариства ім. І. М. Францевича*. 2018, 1 (11). С. 66–75.

34. Trush V.S., Luk'yanenko A.G., Thermodynamic prerequisites formation of compounds of titanium with interstitial elements (C, N, O, B) depending on a temperature and pressure of gaseous medium. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. 2018. No 3 (91). P. 16–25.

35. Труш В.С., Федірко В.М., Лук'яненко О.Г. Методика вибору параметрів термодифузійного насичення титанових сплавів для досягнення заданого рівня поверхневого зміщення. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2019. Вип.1 (114). С. 57–62.

36. Труш В.С., Ковтун К.В., Федірко В.М., Лук'яненко О.Г. До питання про вплив хіміко-термічної обробки на властивості гафнію. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2020. Вип. 3 (284). С. 128–131.

37. Труш В. С., Погрелюк І. М., Федірко В. М., Лук'яненко О.Г. Вплив термодифузійного насичення з вуглецевмісного газового середовища на втомну довговічність та твердість приповерхневого шару титанового сплаву ВТ1-0. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2020. Вип. 3 (122). С. 120–125.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертацій:

38. Pohrelyuk I.M., Padgurskas J., Lavrys' S.M., Luk'yanenko A.G., Trush V.S., Kreivaitis R. Topography, hardness, elastic modulus and wearresistance of nitride coatings on titanium. *Proceedings of the 9th International Conference BALTRIB'2017*. Kaunas, Lithuania. November 16–17, 2017. Kaunas. 2017. P. 41–46.(Scopus, Webof Science).

39. Trush V.S., Fedirkо V.M., Tikhonovsky M.A., Luk'yanenko A.G., Stoев P.I The surface modification effect on hydrogenation and properties of the Zr-1%Nb alloy. *International conference "HighMathTech 2019"*: book of abstracts VI International conference. Kyiv, October. 28-30. 2019. P. 171.

40. Федирко В.Н., Тихоновский М.А., Труш В.С., Лукьяненко А.Г., Стоев П.И. Влияние химико-термической обработки на характеристики труб из сплава Zr-1%Nb. *Высокочистые материалы: получение, применение, свойства: материалы докладов 4^{ой} межд. конф.* г. Харьков, 12–15 сентября 2017 г. Харьков: ННЦ ХФТИ., 2017 С. 45.

41. Федірко В.М., Труш В.С., Лук'яненко О.Г., Погрелюк І.М. Вплив дифузійного насичення в контролюваних газових середовищах на механічні властивості титанових сплавів. *Титан 2018. Производство и применение в Украине*: сб. докл. межд. конф. г. Київ, 11-13 июня, 2018 г. Київ. 2018. С. 151-154.
42. Voyevodin V.N., Fedirkо V.N., Trush V.S., Lukyanenko A.G., Tikhonovsky M.A., Stoев P.I., Panov V.A. Influence of thermochemical treatment modes on the oxidation process of fuel cladding tubes from Zr-1%Nb alloy. *Problems of corrosion and corrosion protection of materials (Corrosion-2020)*: book of Abstract of XV International Conference. Lviv, Ukraine, October 15-16, 2020. Lviv. 2020. P. 32.
43. Trush V.S., Luk'yanenko A.H., Fedirkо V.M., Kovtun K.V. The influence of vacuum treatment of different range on size hardened subsurface layers of the HFE-1 hafnium alloy. *The International research and practice conference "Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2017)*. Abstract Book of participants of the International summer school and International research and practice conference. Chernivtsi, Ukraine, August 23-26, 2017. P. 456.
44. Погрелюк І.М., Федірко В.М., Лук'яненко О.Г., Труш В.С. Підвищення ресурсу деталей з титанових сплавів хіміко-термічною обробкою при виготовленні авіаційної техніки. *Актуальні проблеми розвитку авіаційної техніки*: тези доповідей та виступів міжн. наук.-практ. конф., м. Київ 11 жовтня, 2018 р. 2018. С. 77.
45. Труш В.С., Тихоновський М.А., Федирко В.Н, Лукьяненко О.Г., Стоев П.И. Влияние оксидирования циркониевого сплава Zr-1%Nb на длительную прочность при температуре $T = 380^{\circ}\text{C}$. *Наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України*: тези доповідей XXV щорічної наук. конф. Київ, 16-20 квітня 2018 р. Київ: Ін-т ядерних дослідж. 2018. С.143–144.
46. Труш В.С., Погрелюк І.М., Лук'яненко О.Г., Кравчишин Т.М. Підвищення втомної довговічності титану азотуванням та навуглецеванням. *ABIA-2023*: мат. XVI міжн. наук.-техн. конф. м. Київ 18-20 квітня 2023 р. Київ: НАУ, 2023. С. 1.82–1.84.
47. Труш В.С., Погрелюк І.М., Лук'яненко О.Г., Кравчишин Т.М., Тихоновський М.А., Стоєв П.І. Вплив модифікування поверхневого шару киснем на опірність окисненню сплаву Zr-1%Nb. Міжнародна конференція *Матеріали та технології в інженерії (MTI-2023): інженерія, матеріали, технології, транспорт*: зб. наук. доповідей міжн. конф. м. Луцьк, 16–18 травня 2023 р., Луцьк. 2023. С. 253–255.

10. Впровадження результатів наукових досліджень

Розроблену методологію модифікування поверхневого шару титанових сплавів було використано для хіміко-термічного оброблення деталей різного призначення на ДП «Мотор».

Регламентоване модифікування поверхневого шару елементами втілення шляхом дифузійного насычення в контролюваних газових середовищ для підвищення втомної довговічності тонколистових виробів з титану визнано придатним для використання на ДП “Науково-виробничий центр “Титан” Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.

Робочою групою від ННЦ «ХФТІ» ХФТІ було засвідчено ефективність модифікованих поверхневих шарів для захисту від наводнювання та підвищення опірності руйнуванню за циклічних та статичних тривалих навантажень тонколистових цирконієвих виробів сплаву Zr-1Nb та рекомендовано використовувати розроблені технологічні підходи для формування поверхневих шарів з необхідними властивостями.

Актом підтверджено використання результатів досліджень Труша В.С. у навчальному процесі Національного університету «Львівська політехніка» під час викладання лекційних курсів та лабораторних занять з дисципліни «Технічна механіка» для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство» та 136 «Металургія».

11. Апробація основних результатів дослідження па конференціях, симпозіумах, семінарах тощо

Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались, обговорювались та одержали підтримку на авторитетних міжнародних та вітчизняних науково-технічних конференціях: міжнародній конференції “Ті-2018 в СНГ” (Київ, 2018 р.); 4-ої Міжнародної конференції “Высокочистые материалы: получение, применение, свойства” (Харків, 2017); 24-ій та 25-ій щорічній науковій конференції Інституту ядерних досліджень НАН України (Київ, 2017, 2018, 2022); міжнародній науково-технічній конференції “Нові матеріали і технології в машинобудуванні” (Київ, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019); 24-ій відкритій науково-технічній конференції молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України (Львів, 2015); 9th International conference Balttib'2017 (Lithuania, Kaunas 2017); Міжнародній науково-технічній конференції молодих науковців “Сучасні технології в механіці” (Хмельницький, 2016); 6-ому Міжнародному молодіжному науковому форумі “Litteris et Artibus” (Львів, 2018 р.); 9th International conference of young scientist on welding and related technologies (Kyiv, 2017); Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (Lviv, 2017); 6th Int. conf. “HighMathTech 2019” (Kyiv, 2019); Міжнародному симпозіуму українських інженерів-механіків у Львові (Львів, 2017, 2021, 2023 pp.); Сімнадцятій міжнародній науково-технічній конференції “ABIA-2023” (Київ, 2023); Міжнародній науковій конференції “Матеріали та технології в інженерії: інженерія, матеріали, технології, транспорт” (Луцьк, 2023); Міжнародній науково-технічній конференції “Міцність і довговічність сучасних матеріалів та конструкцій” (Тернопіль, 2022); Міжнародній науково-практичній конференції “Актуальні проблеми розвитку авіаційної техніки” (Київ, 2018); The international research and practice conferenc “Nanotechnology and

“nanomaterials” – NANO-2018 (Chernivtsi, 2017, Kyiv, 2018); Міжнародній науковій конференції “Матеріали для роботи в екстремальних умовах” (Київ, 2018); 6-ій Міжнародній науково-технічній конференції “Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій” (Львів, 2018); Міжнародній науково-технічній конференції “Авіа-2017” (Київ, 2017).

12. Оцінка структури дисертації, її мови та стилю викладення

Дисертація (у вигляді кваліфікаційної наукової праці) викладена послідовно, технічно грамотно, кваліфіковано та доступно для сприйняття. Матеріали логічно систематизовані та оформлені відповідно до вимог. За структурою, мовою та стилем викладення дисертація відповідає вимогам МОН України.

13. Відповідність принципам академічної добросесності

Перевірка дисертації Труша В.С. на академічний plagiat показала відповідність її електронного та паперового варіантів. За результатами перевірки дисертації Труша В.С. академічного plagiatу не виявлено.

14. Відповідність дисертації паспорту спеціальності, за якою вона представлена до захисту

Робота відповідає вимогам паспорту спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство, зокрема напрямку досліджень: «Встановлення закономірностей зв’язку між показниками різних властивостей матеріалів».

15. Характеристика здобувача, ступінь наукової зрілості

Проведені дослідження та опубліковані наукові праці характеризують Труша В.С. як кваліфікованого науковця, фахівця в галузі матеріалознавства і експериментатора-дослідника. Здобувач професійно володіє методологією наукових досліджень. Логічне мислення, вміння ставити наукові завдання та пропонувати нестандартні шляхи їх вирішення, виділяти основні та вторинні аспекти досліджень свідчить про те, що Труш В.С. є сформованим науковцем з достатньо глибоким теоретичним та практичним рівнем підготовки.

ВИСНОВОК

Дисертація Труша Василя Степановича «Наукові основи підвищення роботоздатності металів IV групи (Ti, Zr, Hf) та їх сплавів дифузійним насиченням елементами втілення (O, N, C)» є завершеною науковою працею, у якій вирішено важливу науково-технічну проблему – підвищено роботоздатність тонкостінних виробів зі сплавів на основі титану, цирконію та гафнію та зменшено їх схильність до поглинання водню, завдяки модифікуванню їх поверхневих шарів дифузійним насиченням киснем, азотом, вуглецем згідно з розробленими у роботі рекомендаціями щодо температурно-часових та газодинамічних параметрів процесу насичення, щоб досягти

відповідності властивостей цих виробів регламентним вимогам.

У 47 наукових публікаціях достатньо повно відображені результати дисертації. Дисертація відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство (Перелік наукових спеціальностей, затверджений Наказом Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України 14 вересня 2011 року № 1057), та вимогам, які висуваються до робіт на здобуття наукового ступеня доктора наук, п. 7 та 9 Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук, затверженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року № 1197.

З урахуванням актуальності теми дослідження, наукової новизни, теоретичного та практичного значення одержаних результатів, їх важливості для практики, висновків, особистому внеску здобувача у розв'язання важливої науково-технічної проблеми, достатньої повноти поданих матеріалів дисертації з послідовним їх викладом і відповідністю принципам академічної добросердечності, а також беручи до уваги наукову зрілість та професійні якості Труша Василя Степановича, рекомендувати дисертацію «Наукові основи підвищення роботоздатності металів IV групи (Ti, Zr, Hf) та їх сплавів дифузійним насиченням елементами втілення (O, N, C)» для подання на розгляд спеціалізованій вченій раді щодо прийняття її до захисту на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство.

Рецензенти:

завідувач відділу водневих технологій
та матеріалів альтернативної енергетики
Фізико-механічного інституту
ім. Г.В. Карпенка НАН України,
академік НАН України,
доктор хімічних наук, професор

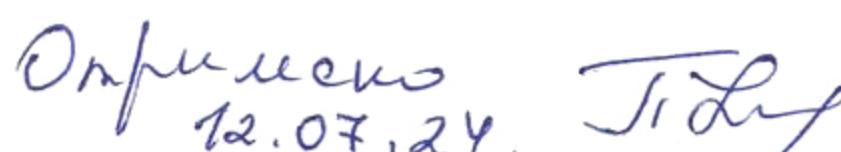
 **Igor ZAVALIJ**

провідний науковий співробітник відділу
діагностики корозійно-водневої
деградації матеріалів
Фізико-механічного інституту
ім. Г.В. Карпенка НАН України,
доктор технічних наук, професор

 **Oleksandra STUDENT**

провідний науковий співробітник відділу
міцності матеріалів та конструкцій у
водневовмісних середовищах
Фізико-механічного інституту
ім. Г.В. Карпенка НАН України,
доктор технічних наук, професор

 **Oleksandr BALIЦКИЙ**

 **Oleg TIKHONOV**