

ЗАТВЕРДЖУЮ

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

Григорій НАЗАРЧУК

« 17 »



ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів докторської дисертації «Наукові основи підвищення функціональних властивостей поверхневих шарів титанових сплавів медичного призначення» (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 ТКАЧУКА Олега Володимировича, представленій 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 (протокол № 7 від 22 серпня 2025 р.) призначені рецензенти, а саме:

- **ЗВІРКО Ольга Іванівна**, завідувач відділу діагностики корозійно-водневої деградації матеріалів Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України, член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор;
- **ОСТАШ Орест Петрович**, завідувач лабораторії структурної механіки руйнування відділу водневих технологій та матеріалів альтернативної енергетики Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України, доктор технічних наук, професор;
- **КРЕЧКОВСЬКА Галина Василівна**, провідний науковий співробітник відділу діагностики корозійно-водневої деградації матеріалів Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України, доктор технічних наук, старший дослідник.

Розглянувши докторську дисертацію ТКАЧУКА Олега Володимировича «Наукові основи підвищення функціональних властивостей поверхневих шарів

титанових сплавів медичного призначення» (тему дисертації затверджено на засіданні Вченої ради Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України 24 червня 2020 р., протокол № 5 та уточнено 2 жовтня 2025 р., протокол № 8), 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 № 3 від 18 вересня 2025 р.), рецензенти підготували висновок про наукову новизну, теоретичне і практичне значення результатів, представлених у докторській дисертації:

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

2. Актуальність теми дослідження

Розробка та використання біоматеріалів для імплантації тісно пов'язані з їх механічними, трибологічними, корозійними та біосумісними властивостями. Біоінертність є необхідною характеристикою елементів суглобів, серцевих клапанів, судинних і коронарних стентів для їх успішної імплантації, а також для тимчасових травматологічних імплантів (пластин, гвинтів, стрижнів) – для їх легкого видалення після відновлення пошкодженої кістки. Остеоінтеграція (біоактивність) постійних імплантів (дентальні імпланти, ніжки кульшового суглоба тощо) покращує їх стабільність і довговічність, знижуючи ймовірність відторгнення та необхідність ревізійної операції.

Титан і його сплави, зокрема VT6 (Ti-6Al-4V), широко використовують в імплантології завдяки високій питомій міцності, корозійній тривкості та біосумісності. Водночас, поверхнева оксидна плівка TiO_2 , яка забезпечує корозійну тривкість сплавів, нестійка при взаємодії з фізіологічним середовищем людського організму. При її порушенні потенційно токсичні іони легувальних елементів, зокрема Al^{3+} і V^{4+} зі сплаву VT6, можуть накопичуватися в організмі та спричиняти захворювання. Окрім цього, титану та його сплавам притаманні низькі трибологічні властивості: високий коефіцієнт тертя та низька

абразивна стійкість. Тому застосовують інженерію поверхні цих матеріалів, зокрема, поверхнєве модифікування з формуванням функціональних поверхневих шарів, що підвищує ефективність їх використання як імплантів. При цьому важливо забезпечити необхідний комплекс характеристик – достатні трибологічні та протикорозійні властивості, а також біосумісність. Одним із методів формування біоактивних покриттів є плазмо-електролітне оксидування (ПЕО). Оскільки довговічність покриттів на металах залежить від міжфазних характеристик покриття–підкладка, то покриття, сформовані дифузійним насиченням із контрольованого газового середовища, за рахунок кращих міжфазних характеристик (формування перехідного дифузійного шару) забезпечують тривалішу стабільність титанових імплантів порівняно з покриттями, сформованими плазмовими та іншими високоенергетичними методами.

Серед українських та зарубіжних вчених, наукові інтереси яких пов'язані з поверхневим модифікуванням титанових сплавів медичного призначення, слід відзначити О. О. Розенберга, В. З. Туркевича, С. О. Фірстова, Н. В. Ульянович, П. Є. Марковського, Н. Ю. Імбірович, О. В. Овчиннікова, Т. В. Лоскутову, М. В. Погорелова, С. Ю. Максимова, M. F. Maitz, E. Richter, F. Rustichelli, B. Subramanian, O. Banakh, M. Mathew, A. Pontearso, A. Lugovskoy, A. Wiskott, A. Kazek-Kesik, S. Durual, T. Wierzchon та інших.

Таким чином, розроблення наукових основ формування біосумісних, зносо- та корозійнотривких покриттів на титанових сплавах медичного призначення методами дифузійного насичення, ПЕО та їх поєднанням є актуальною науковою та прикладною проблемою в галузі матеріалознавства.

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

Робота спочатку виконувалася у відділі високотемпературної міцності конструкційних матеріалів у газових та рідкометалевих середовищах, а після реорганізації відділів продовжувалася у відділі матеріалознавчих основ інженерії поверхні Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України в рамках проєктів: «Розробка фізико-хімічних основ формування композиційних високофункціональних покриттів на титанових сплавах» (№ держреєстрації 0116U008729, 2016 р. та № держреєстрації 0117U001505, 2017 р.); «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.); «Формування поверхневого функціонального шару з характеристиками нового рівня на титановому сплаві медичного призначення» (проєкт науково-дослідних робіт молодих учених НАН України, № держреєстрації 0115U004312, 2015 р. та № держреєстрації 0116U004955, 2016 р.), в яких автор був виконавцем.

Окрім цього, Ткачук О. В. був відповідальним виконавцем проєктів «Розроблення технології поверхневого модифікування титанових компонентів пар тертя штучних суглобів» (№ держреєстрації 0117U001914, 2017 р.; № держреєстрації 0118U000491, 2018 р.; № держреєстрації 0119U101614, 2019 р.; № держреєстрації 0120U101737, 2020 р. та № держреєстрації 0120U101737, 2021 р.) програми «Матеріали для медицини і медичної техніки та технології їх отримання і використання», «Розроблення та впровадження технології поверхневого модифікування деталей зі сплаву ВТ6 для підвищення їх надійності та довговічності» (№ держреєстрації 0121U110373, 2021 р.) програми «Науково-технічні проблеми моніторингу стану, оцінювання і подовження ресурсу конструкцій, обладнання та споруд тривалої експлуатації (РЕСУРС-3)» та керівником проєкту науково-дослідних робіт молодих учених НАН України за грантами НАН України «Модифікування поверхні металу елементами втілення, як спосіб підвищення ресурсу виробів з титанових сплавів» (№ держреєстрації 0111U008321, 2011 р. та № держреєстрації 0112U005111, 2012 р.).

4. Особистий внесок здобувача в одержання наукових результатів

У дисертаційній роботі постановка та обґрунтування завдань досліджень, узагальнення результатів експериментальних досліджень, формулювання положень наукової новизни та висновків здійснено автором самостійно. Структуру та обсяг дисертаційної роботи обговорювали спільно з науковим консультантом доктором технічних наук, професором І. М. Погрелюк. У публікаціях, написаних у співавторстві, О. В. Ткачуку належать: реалізація експерименту та побудова базових залежностей; отримання та аналіз експериментальних результатів; визначення впливу параметрів хіміко-термічної обробки на фазовий склад і властивості нітридних і оксинітридних шарів, сформованих на титанових сплавах медичного призначення; встановлення механізму формування оксинітридних шарів; вивчення ефекту температури фізіологічних розчинів на антикорозійні характеристики титанових сплавів медичного призначення з модифікованими поверхневими шарами; визначення структурно-фазового стану гідроксиапатитних покриттів на титані залежно від складу електроліту; вивчення впливу попереднього азотування та оксинітрування на формування гідроксиапатитних покриттів на титанових сплавах медичного призначення.

У співавторстві з доктором технічних наук, професором Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України С. Є. Шейкіним вивчено трибологічну поведінку азотованих шарів, сформованих на титанових сплавах медичного призначення, у парі з UHMWPE. У співавторстві з член-кореспондентом НАН України, доктором біологічних наук, професором Інституту біології клітини НАН України Р. С. Стойкою вивчено вплив

дифузійних нітридних і оксинітридних шарів на цитосумісність титанових сплавів медичного призначення. Разом з доктором технічних наук, професором Інституту металургії та матеріалознавства ПАН (м. Краків, Польща) Є. Моргелем проведено дослідження мікроструктури оксинітридних шарів із використанням трансмісійної електронної мікроскопії. В Інституті сталих технологій (м. Радом, Польща) проведено випробування пари тертя «технічно чистий титан VT1-0, азотований за етапним режимом – UHMWPE» на стенді-імітаторі біомеханічного руху людини T-24.

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

У докторській дисертації «Наукові основи підвищення функціональних властивостей поверхневих шарів титанових сплавів медичного призначення» матеріали кандидатської дисертації «Розроблення способів оксинітрування для підвищення зносо- та корозійної тривкості титанових сплавів» Ткачука Олега Володимировича не використані.

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

Представлені в дисертації Ткачука О. В. наукові положення, висновки та рекомендації є експериментально і теоретично обґрунтованими, достовірними та апробованими. Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується коректним застосуванням сучасних методів і методик експериментальних досліджень, точністю вимірювання, комп'ютерною та статистичною обробкою результатів експериментів, їх відтворюваністю, узгодженістю з наявними практичними та теоретичними результатами вітчизняних і закордонних авторів.

7. Наукова новизна отриманих результатів

1. Вперше встановлено загальні закономірності впливу структурно-фазового стану модифікованих шарів, сформованих на титанових сплавах медичного призначення дифузійним насиченням із контрольованого азотвмісного газового середовища, на їх функціональні характеристики. Показано, що опір зношуванню азотованого титанового сплаву з поверхневим Ti_2N шаром у трибопарі з надвисокомолекулярним поліетиленом у 10% водному розчині хондроїтину сульфату, який моделює синовіальну рідину, у 2,5 рази перевищує, а опір корозії у розчинах, що моделюють фізіологічне середовище, у 1,5...4 рази поступається азотованому сплаву з поверхневим TiN_x шаром. Окреслено умови формування відповідного структурно-фазового стану приповерхневих шарів на титанових сплавах VT1-0 та VT6 за газового азотування відповідно до функціонального призначення.

2. Розвинуто наукові підходи до формування поверхневих шарів на титанових сплавах медичного призначення насиченням із контрольованого азоткисневмісного газового середовища. Вперше встановлено закономірності оксинітрування в умовах конкурування процесів оксидо- та нітридоутворення, що дає змогу керувати структурно-фазовим станом і функціональними властивостями поверхневих шарів. Встановлено визначальний вплив кисню в оксинітриді титану на опір корозії у фізіологічному середовищі: найвищий опір забезпечує шар складу $TiN_{0,36}O_{0,64}$.

3. Вперше встановлено структурні особливості сформованого насиченням із контрольованого азоткисневмісного газового середовища поверхневого шару на титанових сплавах: наявність численних дефектів двійникування, упаковки та дислокацій у площинах (110) фази типу $\delta-TiN_x$ є наслідком проникнення кисню в кристалічну ґратку із заміщенням атомів азоту атомами кисню та утворенням фази TiN_xO_{1-x} .

4. Вперше встановлено біосумісність *in vitro* поверхневих шарів на титанових сплавах медичного призначення, модифікованих киснем і азотом. Показано, що азотована поверхня на базі мононітриду титану складу, наближеного до стехіометричного, та модифікована поверхня титану з вмістом кисню 60...65 ат.% в кристалічній ґратці оксинітриду ефективна для адгезії та проліферації клітин.

5. Вперше встановлено ефективність лужного електроліту (KOH + гідроксиапатит) (рН=14) для формування шару гідроксиапатиту плазмо-електролітним оксидуванням на поверхні титанових сплавів медичного призначення з регламентованою морфологією поверхні (шорсткістю, поруватістю) та співвідношенням Ca/P=1,69, близьким до кісткової тканини.

6. Вперше розроблено біоактивні композиційні покриття на поверхні титанових сплавів поєднанням методів дифузійного насичення з азоткисневмісного газового середовища та ПЕО в лужному електроліті (KOH + гідроксиапатит), що підвищує на порядок опір корозії у фізіологічному середовищі та забезпечує значення модуля Юнга на рівні значення кортикальної кістки.

8. Практичне значення отриманих результатів

1. Для поверхневого модифікування сферичних титанових (BT1-0) компонентів ендопротезів вперше розроблено етапний режим азотування, який забезпечує зменшення на один порядок інтенсивності зношування UHMWPE компонента в плазмі крові та у 6 разів коефіцієнта тертя (патент України на корисну модель № 159948 від 24.07.2025 р.).

2. Проведено апробацію поверхнево модифікованого титанового сферичного компонента пари тертя штучного суглоба на стенді-імітаторі біомеханічного руху людини Т-24. Встановлено, що трибопара «азотований

титан VT1-0 – UHMWPE» забезпечує у 3 рази більший ресурс порівняно з широко використовуваною в імплантології трибопарою «CoCrMo – UHMWPE».

3. Запропоновано склад лужного електроліту (1М КОН + гідроксиапатит) і параметри ПЕО (160 В, 1хв) за імпульсного режиму обробки для формування біоактивних гідроксиапатитних покриттів регламентованих параметрів (товщина до 100 мкм, шорсткість поверхні 1...2 мкм та поруватість 14...16%) на поверхні технічно чистого титану VT1-0.

4. Встановлено, що рівень біосумісності композиційних (оксинітрид/ГА) покриттів забезпечується формуванням оксинітридів титану з вмістом кисню 60...65 ат.%, а остеоінтеграції – формуванням поверхневого шару гідроксиапатиту зі співвідношенням Са/Р, близьким до кісткової тканини (1,67), з шорсткістю поверхні 1...2 мкм, поруватістю 15...22% і середнім розміром пор 1,5...2,0 мкм.

5. Розроблено спосіб оксинітрування титанових сплавів для забезпечення широкої колірної гами поверхні (патент України на корисну модель № 65352 від 12.12.2011 р.).

9. Повнота викладення матеріалів дисертації в опублікованих наукових працях

Дисертація Ткачука О.В. 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» (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.).

За темою дисертаційної роботи опубліковано 50 наукових праць, з них 1 монографія, 1 розділ в англomовній монографії, 29 статей у наукових фахових виданнях України та періодичних виданнях інших держав (з них 24 у виданнях, що входять до наукометричних баз даних Scopus і Web of Science), 17 у матеріалах і тезах доповідей міжнародних і вітчизняних науково-технічних конференцій, 2 патенти України на корисну модель. Опубліковано у журналах квартилів Q1 – 6, Q2 – 8 та Q3 – 10 наукових праць. Індекс Гірша (h-index) автора становить 11.

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

Монографія та розділ в іноземній книзі:

1. Погрелюк І.М., Ткачук О.В. Хіміко-термічна обробка титанових сплавів. Оксинітрування. Л.: Простір-М, 2021. с. 204. (Монографія).

Особистий внесок здобувача: написано розділи 3–5, 7 монографії.

2. Sheykin S.Ye., Pohrelyuk I.M., **Tkachuk O.V.** The use of c.p. titanium in medical friction pairs (Chapter 6). In book *Biotribology: Emerging Technologies and Applications*, editors Rao T.V.V.L.N., Kasolang S. B., Guoxin X., Kumar Katiyar J., Abdul Rani A.M. CRC Press. Boca Raton. United States of America. 2021. P. 1–31. (Розділ у книзі).

Особистий внесок здобувача: проаналізовано вплив параметрів азотування на формування на титані нітридного шару з підвищеними трибологічними характеристиками.

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

3. **Tkachuk O.V.**, Sheykin S.E., Lavrys S.M., Rostotskii I.Yu., Danyliak M.-O.M., Pohrelyuk I.M., Proskurnyak R.V. Effect of stage gas nitriding on corrosion and wear resistance of Ti6Al4V alloy in physiological environment. *Vacuum*. 2024. Vol. 230. Article number 113713. (Scopus, WoS, Q1). <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2024.113713>.

Особистий внесок здобувача: проаналізовано структурно-фазовий стан поверхневих шарів, сформованих на титановому сплаві Ti-6Al-4V після газового азотування, суміщеного з термічною обробкою.

4. Proskurnyak R.V, **Tkachuk O.V.**, Pohrelyuk I.M, Padgurskas J., Kuznietsov O.V, Gnilitzkyi I.M. Characterization of hydroxyapatite coatings deposited on gas nitrided Ti-6Al-4V alloy. *Materials Today Communications*. 2025. Vol. 46. Article number 112771. (Scopus, WoS, Q1). <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.112771>.

Особистий внесок здобувача: встановлено вплив складу нітридного шару на формування гідроксиапатитного покриття на сплаві Ti-6Al-4V.

5. Pohrelyuk I., Morgiel J., **Tkachuk O.**, Szymkiewicz K. Effect of temperature on gas oxynitriding of Ti-6Al-4V alloy. *Surface & Coatings Technology*. 2019. Vol. 360. P. 103–109. (Scopus, WoS, Q1). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.01.015>.

Особистий внесок здобувача: встановлено механізм формування оксинітридних шарів на сплаві Ti-6Al-4V.

6. Pohrelyuk I.M., Fedirko V.M., **Tkachuk O.V.**, Proskurnyak R.V. Corrosion resistance of Ti-6Al-4V alloy with nitride coatings in Ringer's solution. *Corrosion Science*. 2013. Vol. 66. P. 392–398. (Scopus, WoS, Q1). <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.10.005>.

Особистий внесок здобувача: проаналізовано вплив температури розчину Рінгера на антикорозійні характеристики азотованого сплаву Ti-6Al-4V.

7. Pohrelyuk I.M., **Tkachuk O.V.**, Proskurnyak R.V., Boiko N.M., Kluchivska O.Yu., Stoika R.S. Effect of thermodiffusion nitriding on cytocompatibility of Ti-6Al-

4V titanium alloy. *JOM*. 2016. Vol. 68. P. 1109–1115. (Scopus, WoS, Q1). <https://doi.org/10.1007/s11837-016-1824-2>.

Особистий внесок здобувача: досліджено структурно-фазовий стан і структуру нітридних шарів на сплаві Ti-6Al-4V.

8. Pohrelyuk I.M., **Tkachuk O.V.**, Proskurnyak R.V. Corrosion resistance of the Ti-6Al-4V titanium alloy with nitride coatings in 0.9 % NaCl. *JOM*. 2011. Vol. 63. P. 35–40. (Scopus, WoS, Q1). <https://doi.org/10.1007/s11837-011-0090-6>.

Особистий внесок здобувача: вивчено вплив температури фізіологічного розчину на корозійну тривкість азотованого титанового сплаву Ti-6Al-4V.

9. **Tkachuk O.V.**, Pohrelyuk I.M., Proskurnyak R.V., Danyliak M.-O.M., Vynar V.A. Influence of concentration of potassium hydroxide in electrolyte on formation of hydroxyapatite coatings on titanium. *JOM*. 2023. Vol. 75. P. 5088–5095. (Scopus, WoS, Q2). <https://doi.org/10.1007/s11837-023-06056-2>.

Особистий внесок здобувача: проаналізовано структуру гідроксиапатитних покриттів, осаджених на титані залежно від концентрації KOH в електроліті.

10. **Tkachuk O.V.**, Pohrelyuk I.M., Proskurnyak R.V., Morgiel J., Faryna M., Goral A. Morphology and corrosion resistance of hydroxyapatite coatings formed on commercially pure titanium. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2023. Vol. 32. P. 11040–11049. (Scopus, WoS, Q2). <https://doi.org/10.1007/s11665-023-07910-9>.

Особистий внесок здобувача: досліджено морфологію гідроксиапатитних покриттів, сформованих на технічно чистому титані.

11. Lavrys S., Pohrelyuk I., **Tkachuk O.**, Padgurskas J., Trush V., Proskurnyak R. Comparison of friction behaviour of titanium Grade 2 after non-contact boriding in oxygen-containing medium with gas nitriding. *Coatings*. 2023. Vol. 13. Article number 282. (Scopus, WoS, Q2). <https://doi.org/10.3390/coatings13020282>.

Особистий внесок здобувача: досліджено вплив температури азотування на формування нітридного шару на титані.

12. Pohrelyuk I.M., **Tkachuk O.V.**, Proskurnyak R.V., Boiko N.M., Kluchivska O.Yu., Stoika R.S., Ozga P. Cytocompatibility evaluation of Ti-6Al-4V alloy after gas oxynitriding. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020. Vol. 29. P. 7785–7792. (Scopus, WoS, Q2). <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05265-z>.

Особистий внесок здобувача: проаналізовано вплив парціального тиску кисню на формування оксинітридів різного компонентного складу на титановому сплаві Ti-6Al-4V.

13. Pohrelyuk I., **Tkachuk O.**, Proskurnyak R., Guspiel J., Beltowska-Lehman E., Morgiel J. Influence of regulated modification of nitride layer by oxygen on the electrochemical behavior of Ti-6Al-4V alloy in the Ringer's solution. *Materials*

and Corrosion. 2019. Vol. 70. P. 2320–2325. (Scopus, WoS, Q2).
<https://doi.org/10.1002/maco.201911018>.

Особистий внесок здобувача: проаналізовано вплив компонентного складу оксинітриду титану на морфологію поверхневих шарів на титановому сплаві Ti-6Al-4V.

14. Pohrelyuk I.M., Sheykin S.E., Dub S.M., Mamalis A.G., Rostotskii I.Yu., **Tkachuk O.V.**, Lavrys S.M. Increasing of functionality of c.p. titanium/UHMWPE tribo-pairs by thermodiffusion nitriding of titanium component. *Biotribology*. 2016. Vol. 7. P. 38–45. (Scopus, WoS, Q2). <https://doi.org/10.1016/j.biotri.2016.08.002>.

Особистий внесок здобувача: проаналізовано вплив параметрів азотування на приповерхнєве зміцнення титану.

15. Pohrelyuk I., **Tkachuk O.**, Proskurnyak R. Effect of oxidation of nitride coatings on corrosion properties of Ti-6Al-4V alloy in 0.9% NaCl at 40°C. *Central European Journal of Chemistry*. 2014. Vol. 12. P. 260–265. (Scopus, WoS, Q2). <https://doi.org/10.2478/s11532-013-0363-8>.

Особистий внесок здобувача: встановлено вплив низько- та високотемпературного окиснення нітридних шарів на фазовий склад і структуру титанового сплаву Ti-6Al-4V.

16. **Tkachuk O.V.**, Proskurnyak R.V., Holovchuk M.Ya. Morphology of hydroxyapatite coatings formed on VT1-0 titanium as a result of combined treatment. *Materials Science*. 2022. Vol. 58. P. 75–79. (Scopus, WoS, Q2). <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00633-7>.

Особистий внесок здобувача: проаналізовано вплив складу нітриду титану на формування гідроксиапатитного покриття на титані.

17. **Tkachuk O.V.**, Pohrelyuk I.M., Proskurnyak R.V., Guspiel J., Beltowska-Lehman E., Morgiel J. Electrochemical behavior of Ti-6Al-4V alloy in Ringer's solution after oxynitriding. *Materials Science*. 2019. Vol. 54. P. 542–546. (Scopus, WoS, Q3). <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00215-0>.

Особистий внесок здобувача: проаналізовано корозійну поведінку в розчині Рінгера оксинітрованого сплаву Ti-6Al-4V.

18. **Tkachuk O.V.**, Proskurnyak R.V., Pohrelyuk I.M. Analysis of the surface and corrosion resistance of nitrided and oxynitrided VT6C alloys in a physiological solution at 36 and 40°C. *Materials Science*. 2015. Vol. 50. P. 882–888. (Scopus, WoS, Q3). <https://doi.org/10.1007/s11003-015-9797-9>.

Особистий внесок здобувача: проаналізовано морфологію поверхні титанового сплаву VT6c після газового азотування та оксинітрування.

19. **Tkachuk O.**, Proskurnyak R., Pohrelyuk I., Fedirko V. Corrosion behaviour of thermodiffusion coatings on titanium implants in simulated body fluids. *Solid State Phenomena*. 2015. Vol. 227. P. 503–506. (Scopus, WoS, Q3). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.227.503>.

Особистий внесок здобувача: вивчено корозійну поведінку нітридних і оксинітридних шарів у фізіологічних розчинах.

20. **Tkachuk O.**, Pohrelyuk I., Proskurnyak R. Surface modification of titanium implants. *Key Engineering Materials*. 2019. Vol. 813. P. 215–220. (Scopus, WoS, Q3). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.813.215>.

Особистий внесок здобувача: вивчено вплив температури азотування та парціального тиску азоту на морфологію та фазовий склад поверхневих шарів титану.

21. Proskurnyak R.V., **Tkachuk O.V.**, Student M.M., Padgurskas J. Structure and mechanical properties of hydroxyapatite coating deposited on nitrogen-modified titanium surface. *Materials Science*. 2025. Vol. 60. P. 634–639. (Scopus, WoS, Q3). <https://doi.org/10.1007/s11003-025-00930-x>.

Особистий внесок здобувача: встановлено вплив попереднього дифузійного насичення титану азотом на фазовий склад ПЕО покриття.

22. Pohrelyuk I.M., **Tkachuk O.V.**, Proskurnyak, R.V., Kuznetsov O.V., Gnilitskyi Ya.M. Morphology and corrosion properties of hydroxyapatite coating on VT6 titanium alloy. *Materials Science*. 2023. Vol. 58. P. 781–787. (Scopus, WoS, Q3). <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00730-1>.

Особистий внесок здобувача: досліджено морфологію гідроксиапатитного покриття, сформованого на титановому сплаві VT6.

23. Pohrelyuk I.M., Proskurnyak R.V., **Tkachuk O.V.**, Obukh Yu.V. Formation of hydroxyapatite coatings on titanium by plasma-electrolytic oxidation in alkaline electrolytes. *Materials Science*. 2020. Vol. 55. P. 563–568. (Scopus, WoS, Q3). <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00339-8>.

Особистий внесок здобувача: встановлено вплив напруги осадження на морфологію поверхні та товщину гідроксиапатитних покриттів, осаджених на титані.

24. Pohrelyuk I.M., Proskurnyak R.V., **Tkachuk O.V.**, Goral A. Influence of the parameters of plasma-electrolytic oxidation on the formation of calcium-phosphate coatings on titanium. *Materials Science*. 2019. Vol. 54. P. 789–795. (Scopus, WoS, Q3). <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00265-4>.

Особистий внесок здобувача: встановлено вплив напруги та часу осадження на фазовий склад гідроксиапатитних покриттів на титані.

25. Pohrelyuk I.M., Fedirko V.M., **Tkachuk O.V.**, Proskurnyak R.V., Korol'ova T.V. Corrosion behavior of VT6S titanium alloy in a physiological solution after chemicothermal treatment. *Materials Science*. 2018. Vol. 53. P. 796–804. (Scopus, WoS, Q3). <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0138-7>.

Особистий внесок здобувача: встановлено вплив типу нітриду титану на формування оксинітридних шарів на титановому сплаві VT6с.

26. Fedirko V.M., Pohrelyuk I.M., **Tkachuk O.V.**, Proskurnyak R.V. Corrosion behavior of VT6S titanium alloy with oxidized nitride layers in 0.9% NaCl

at 36°C. *Materials Science*. 2013. Vol. 48. P. 769–775. (Scopus, WoS, Q3).
<https://doi.org/10.1007/s11003-013-9568-4>.

Особистий внесок здобувача: проаналізовано корозійну поведінку сплаву VT6с з оксинітридними шарами у 0,9% NaCl.

Статті у вітчизняних і зарубіжних фахових виданнях:

27. Pohrelyuk I.M., **Tkachuk O.V.**, Proskurnyak R.V. Corrosion behaviour of Ti-6Al-4V alloy with nitride coatings in simulated body fluids at 36°C and 40°C. *ISRN Corrosion*. 2013. Vol. 2013. Article number 241830.
<https://doi.org/10.1155/2013/241830>.

Особистий внесок здобувача: встановлено вплив парціального тиску азоту на формування структурно-фазового стану при азотуванні титанового сплаву Ti-6Al-4V.

28. Pohrelyuk I., Fedirko V., **Tkachuk O.**, Proskurnyak R. Corrosion resistance of Ti-6Al-4V alloy with oxidized nitride coatings in Ringer's solution. *Inżynieria Powierzchni*. 2015. Nr 1. P. 38–46.

Особистий внесок здобувача: встановлено вплив процесу окиснення нітридних шарів на формування оксинітридних шарів на сплаві Ti-6Al-4V.

29. **Tkachuk O.** Corrosion properties of Ti-6Al-4V alloy with nitride and oxynitride coatings in physiological solutions. *Machines, Technologies, Materials*. 2015. Iss. 1. P. 29–31.

30. **Ткачук О.В.**, Погрелюк І.М., Проскурняк Р.В. Вплив температури на термодифузійне насичення титану в азоткисневмісному середовищі. *Наукові нотатки*. 2011. Вип. 31. С. 380–383.

Особистий внесок здобувача: встановлено вплив температури оксинітрування на формування структурно-фазового стану поверхневих шарів титану.

31. Погрелюк І.М., **Ткачук О.В.**, Проскурняк Р.В. Вплив температури фізіологічного розчину на корозійну стійкість титанових імплантатів з покриттями. *Літопис травматології та ортопедії*. 2014. № 1–2. С. 66–68.

Особистий внесок здобувача: вивчено корозійну тривкість титанових імплантів із покриттями у фізіологічному розчині.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

32. **Tkachuk O.** Surface engineering of titanium alloys in controlled gas environments for aviation and medicine. *2017 Qingdao International Technology Transfer Conference & Aoshan Eurasian Science and Technology Forum: project book*, Qingdao, China, 27 November – 01 December 2017. # 2017QD-Ukraine-050.

33. **Tkachuk O.** Corrosion properties of Ti-6Al-4V alloy with nitride and oxynitride coatings in physiological solutions. *Technical Science and Industrial Management: proceedings of VIII International Science Conference for Young Researchers*. Varna, Bulgaria, 15.-16.09.2014. P. 6–8.

34. **Tkachuk O.**, Proskurnyak R., Pohrelyuk I., Fedirko V. Corrosion behaviour of thermodiffusion coatings on titanium implants in simulated body fluids. *Corrosion 2014: book of abstracts of International Scientific Conference, Gliwice, Poland, 18-21 November 2014*. P. 89.

Особистий внесок здобувача: проаналізовано антикорозійні характеристики нітридних і оксинітридних шарів у фізіологічних розчинах.

35. **Tkachuk O.**, Proskurnyak R. Formation of hydroxyapatite coatings on previous nitrided titanium surface. *Materials Science and Surface Engineering: proceedings of International Young Scientists Conference, Lviv, Ukraine, 22-24 September 2021. Materials Science and Surface Engineering (MSSE2021), Lviv, 2021*. P. 30–33.

Особистий внесок здобувача: вивчено вплив попереднього азотування на формування гідроксиапатитних покриттів на титані.

36. **Tkachuk O.**, Proskurnyak R. Deposition of calcium phosphate coating on titanium depends on electrolyte composition. *Materials Science and Surface Engineering: proceedings of International Young Scientists Conference, Lviv, Ukraine, 27–29 September 2023. Materials Science and Surface Engineering (MSSE2023), Lviv, 2023*. P. 76–79.

Особистий внесок здобувача: проаналізовано вплив складу електроліту на структурно-фазовий стан гідроксиапатитних покриттів на титані.

37. **Tkachuk O.**, Proskurnyak R. Regularities of oxynitride layer formation on VT6s titanium alloy. *Welding and Related Technologies: proceedings of 9th International Conference of Young Scientists, Kyiv, Ukraine, 23-26 May 2017. PWI NASU, 2017*. P. 194–197.

Особистий внесок здобувача: встановлено вплив парціального тиску азоту на формування оксинітридних шарів на титановому сплаві VT6s.

38. **Tkachuk O.**, Proskurnyak R. Influence of initial surface topography of titanium on formation of hydroxyapatite coatings. *Materials Science and Surface Engineering MSSE2019: abstracts of Young Scientists Conference, Lviv, Ukraine, 25-27 September 2019. Problems of Materials Science and Surface Engineering, Lviv, 2019*. P. 116–119.

Особистий внесок здобувача: вивчено вплив вихідної топографії поверхні на фазовий склад гідроксиапатитних покриттів на титані.

39. Погрелюк І.М., **Ткачук О.В.**, Проскурняк Р.В. Вплив температури фізіологічного розчину на корозійну стійкість титанових імплантатів з покриттями. *Проблеми біомеханіки та медичного матеріалознавства: міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 21-22 листопада 2013 р. Літопис травматології та ортопедії. 2014. № 1–2*. С. 204.

Особистий внесок здобувача: вивчено вплив температури фізіологічного розчину на корозійну тривкість титанового сплаву з покриттями.

40. Труш В.С., Ткачук О.В., Проскурняк Р.В. Корозійна стійкість у фізіологічних розчинах азотованого титанового сплаву медичного призначення. *КМН-2015: матеріали XXIV Відкритої науково-технічної конференції молодих науковців і спеціалістів*, м. Львів, 20-22 жовтня 2015 р. Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2015 р. С. 119–122.

Особистий внесок здобувача: вивчено корозійну тривкість азотованого титанового сплаву медичного призначення у фізіологічних розчинах.

41. Федірко В.М., Погрелюк І.М., Ткачук О.В., Проскурняк Р.В., Труш В.С. Корозійна поведінка титанового сплаву VT6c з нітридними покриттями у фізіологічних розчинах. *Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів: спецвипуск журналу Фізико-хімічна механіка матеріалів. № 9.* Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2012. Т. 2. С. 475–479.

Особистий внесок здобувача: проаналізовано вплив азотування на корозійну тривкість сплаву VT6c у фізіологічних розчинах.

42. Труш В., Ткачук О., Проскурняк Р., Погрелюк І. Вплив модифікованого поверхневого шару на корозійні властивості титанового сплаву VT6 у фізіологічному розчині. *Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів: спецвипуск журналу “Фізико-хімічна механіка матеріалів”. № 11.* Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2016. С. 193–197.

Особистий внесок здобувача: встановлено вплив параметрів оксинітрування на структурно-фазовий стан поверхневих шарів титанового сплаву VT6.

43. Ткачук О., Проскурняк Р. Вплив температури окиснення нітриду титану на корозійну тривкість сплаву Ti64 у 0,9% розчині хлориду натрію. *Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів: спецвипуск журналу Фізико-хімічна механіка матеріалів. № 13.* Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2020. С. 56–59.

Особистий внесок здобувача: вивчено корозійну поведінку титанового сплаву Ti64.

44. Проскурняк Р.В., Ткачук О.В. Корозійна стійкість титанового сплаву VT6c з термодифузійними покриттями у 0,9 % NaCl. *КМН-2017: XXV відкрита науково-технічна конференція молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України*, м. Львів, 27-29 вересня 2017 року. *Проблеми корозійно-механічного руйнування, інженерія поверхні, діагностичні системи*, Львів, 2017. С. 76–79.

Особистий внесок здобувача: проаналізовано фазовий склад оксинітрованого шару на титановому сплаві VT6c.

45. Проскурняк Р., Ткачук О. Кальцій-фосфатні покриття на титані. *Сучасні технології в механіці: збірник наукових праць наукової конференції*,

м. Хмельницький, 19...21 квітня 2018 р. Хмельницький: ФОП Мельник А.А., 2018. С. 106–107.

Особистий внесок здобувача: встановлено вплив напруги осадження на формування кальцій-фосфатних покриттів на титані в кислому електроліті.

46. Pohrelyuk I.M., Tkachuk O.V., Proskurnyak R.V. Formation of hydroxyapatite coatings on dental titanium implants. *HighMathTech 2019: book of abstracts of 6th International Conference*, Kyiv, Ukraine, October 28-30, 2019. P. 167.

Особистий внесок здобувача: вивчено вплив напруги осадження на товщину та шорсткість поверхні гідроксиапатитних покриттів.

47. Pohrelyuk I., Tkachuk O., Proskurnyak R. Effect of temperature of nitride oxidation on corrosion resistance of Ti64 alloy in 0,9% sodium chloride solution. *Problems of Corrosion and Corrosion Protection of Materials (Corrosion-2020): abstract book of XV International Conference*, Lviv, Ukraine, October 15-16, 2020. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine. Lviv, 2020. P. 20.

Особистий внесок здобувача: проаналізовано корозійну поведінку титанового сплаву Ti64 у фізіологічному розчині.

48. Проскурняк Р.В., Ткачук О.В. Вплив напруги осадження на формування кальцій-фосфатних покриттів на титані. *Надтверді, композиційні матеріали та покриття: отримання, властивості, застосування: тези доповідей Дванадцятої конференції молодих вчених та спеціалістів*, м. Київ, 19–20 жовтня 2023 р. Київ: ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2023. С. 77.

Особистий внесок здобувача: вивчено фазовий склад кальцій-фосфатних покриттів, осаджених на титані в лужному електроліті.

Патенти:

49. Федірко В.М., Погрелюк І.М., Ткачук О.В. Спосіб хіміко-термічної обробки титанових сплавів. Патент на корисну модель № 65352 Україна. Заявл. 17.02.2011 р. Публ. 12.12.2011 р. Бюл. № 23. с. 4.

Особистий внесок здобувача: проаналізовано вплив температури на компонентний склад оксинітриду титану.

50. Погрелюк І.М., Ткачук О.В., Лавриць С.М. Спосіб поверхневого модифікування титанових сплавів. Патент на корисну модель № 159948 Україна. Заявл. 29.10.2024 р. Публ. 24.07.2025 р. Бюл. № 30/25. с. 4.

Особистий внесок здобувача: проаналізовано вплив поверхневого модифікування на корозійну тривкість титанових сплавів.

10. Впровадження результатів наукових досліджень

Підприємством ТОВ «ЕЙ БІ ЕМ ТЕХНОЛОДЖІ» засвідчено ефективність попередньо модифікованої поверхні титану для формування кальційфосфатних покриттів та рекомендовано використовувати поєднання дифузійного методу з газової фази та плазмо-електролітної обробки в лужному електроліті для

формування комплексних біосумісних кальційфосфатних покриттів на поверхні титанових сплавів медичного призначення.

У клініці ТОВ «Медичний центр «Добробут-Поліклініка»» проведено оперативне втручання з імплантуванням штучного суглобу, в якому використано титановий компонент шарнірного зчленування, поверхнево модифікований за розробленим режимом.

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

Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та одержали позитивну оцінку на міжнародних і вітчизняних науково-технічних конференціях: XI Міжнародній конференції “Проблеми корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів” (Львів, 2012 р.); Міжнародній науково-практичній конференції “Проблеми біомеханіки та медичного матеріалознавства” (Київ, 2013 р.); VIII International Science Conference for Young Researchers “Technical Science and Industrial Management” (Bulgaria, Varna, 2014); International Scientific Conference “Corrosion 2014” (Poland, Gliwice, 2014); XXX International Conference on Surface Modification Technologies (SMT30) (Italy, Milan, 2016); 9th International conference of young scientists on welding and related technologies (Kyiv, 2017); XXV відкритій науково-технічній конференції молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України КМН – 2017 (Львів, 2017 р.); 2017 Qingdao International Technology Transfer Conference & Aoshan Eurasian Science and Technology Forum (China, Qingdao, 2017); Науковій конференції “Сучасні технології в механіці” (Хмельницький, 2018 р.); International Conference “HighMatTech-2019” (Kyiv, 2019); XV International Conference “Problems of Corrosion and Corrosion Protection of Metals” (Corrosion-2020) (Lviv, 2020); International Young Scientists Conference on Materials Science and Surface Engineering (Lviv, 2021); XVI International Conference “Problems of Corrosion and Corrosion Protection of Materials” (Lviv, 2022); International Young Scientists Conference on Materials Science and Surface Engineering (Lviv, 2023); XII конференції молодих вчених та спеціалістів “Надтверді, композиційні матеріали та покриття: отримання, властивості, застосування” (Київ, 2023 р.); IX Міжнародній науково-практичній конференції “Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування” (Луцьк, 2023 р.); 12th International Conference BALTRIB'24 (Lithuania, Kaunas, 2024).

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 доброчесності

Перевірка дисертації Ткачука О. В. на академічний плагіат показала відповідність її електронного та паперового варіантів. За результатами перевірки дисертації Ткачука О. В. академічного плагіату не виявлено.

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

Робота відповідає 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 Ткачука О. В. як кваліфікованого науковця, фахівця в галузі матеріалознавства та 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 Ткачук О. В. є сформованим науковцем з достатньо високим теоретичним і практичним рівнем підготовки.

ВИСНОВОК

Дисертація ТКАЧУКА Олега Володимировича «Наукові основи підвищення функціональних властивостей поверхневих шарів титанових сплавів медичного призначення» є завершеною науковою працею, у якій вирішено важливу науково-технічну проблему – підвищення комплексу біосумісних, зносо- та протикорозійних характеристик титанових сплавів медичного призначення за допомогою інженерії їх поверхні шляхом формування відповідного структурно-фазового стану нітридних і оксинітридних шарів дифузійним насиченням з контрольованого газового середовища та гідроксиапатитних покриттів регламентованих параметрів плазмо-електролітним оксидуванням.

У 50 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 від 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, 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.).

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 доброчесності, а також беручи до уваги наукову зрілість та професійні якості ТКАЧУКА Олега Володимировича, рекомендувати дисертацію «Наукові основи підвищення функціональних властивостей поверхневих шарів титанових сплавів медичного призначення» 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 діагностики
корозійно-водневої деградації
матеріалів
Фізико-механічного інституту
ім. Г. В. Карпенка НАН України,
член-кореспондент НАН України,
доктор технічних наук, професор



Ольга ЗВІРКО

завідувач лабораторії структурної
механіки руйнування
відділу водневих технологій та
матеріалів альтернативної енергетики
Фізико-механічного інституту
ім. Г. В. Карпенка НАН України,
доктор технічних наук, професор



Орест ОСТАШ

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



Галина КРЕЧКОВСЬКА

