

МАШОВЕЦЬ НАТАЛІЯ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-9181-5253>e-mail: mashovetsns@ukr.net

КОРИННИЙ АНТОН

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0000-9445-5054>e-mail: korinnijanton@gmail.com

БАНАШКО ТАРАС

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0006-8939-8597>e-mail: banashko.taras@icloud.com

ПІДВИЩЕННЯ КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНОЇ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ АЗОТУВАННЯМ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ: ОГЛЯД СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В даній роботі проведено огляд сучасних досліджень у галузі підвищення корозійно-механічної зносостійкості титанових сплавів за допомогою азотування в тліючому розряді. Титанові сплави, завдяки своїм унікальним властивостям, знаходять широке застосування в авіації, медицині, машинобудуванні та багатьох інших галузях промисловості. Проте, підвищення їхньої зносостійкості та корозійної стійкості є критично важливим для розширення спектру їх застосування. Аналіз наукових досліджень демонструє значне покращення зносостійкості та корозійної стійкості азотованих титанових сплавів. Також розглянуто перспективи подальших досліджень у цій області.

Ключові слова: азотування в тліючому розряді, корозійно-механічна зносостійкість, титанові сплави.

MASHOVETS NATALIIA, KORINNIY ANTON, BANASHKO TARAS
Khmelnitskiy National University

INCREASE OF THE CORROSION-MECHANICAL WEAR RESISTANCE OF TITANIUM ALLOYS BY NITRIDATION IN THE GLOW DISCHARGE: A REVIEW OF MODERN RESEARCH

In this work, a review of modern research in the field of increasing the corrosion-mechanical wear resistance of titanium alloys using glow discharge nitriding is carried out. Titanium alloys, due to their unique properties, namely high strength, lightness, exceptional corrosion resistance and excellent biocompatibility, are widely used in aviation, medicine, engineering and many other industries. However, operational conditions in some applications require even greater improvement of the wear resistance and corrosion resistance of these alloys, which makes the search for effective methods of their improvement an urgent scientific and engineering task.

Among the promising technologies that can be used to improve the corrosion-mechanical properties of titanium alloys, low-temperature anhydrous nitriding in a glow discharge should be considered. The use of low-temperature anhydrous nitriding in a glow discharge eliminates the growth of the base grain and hydrogen embrittlement of the surface. Also, low-temperature nitriding in a glow discharge makes it possible to increase the wear resistance of the surface of titanium alloys, while the saturation of the surface with nitrogen is controlled, which allows predicting the results of processing, does not lead to a change in the shape of parts.

The analysis of scientific research shows that increasing the corrosion-mechanical wear resistance of titanium alloys by means of nitriding in a glow discharge is a promising direction that opens up new opportunities for industry and science. Progress in this field depends on further research, innovative development and the integration of the latest technologies, which together will contribute to the creation of more durable, efficient and environmentally friendly materials for a wide range of applications.

In general, increasing the corrosion-mechanical resistance of titanium alloys by the method of nitriding in a glow discharge is a promising direction of research in Ukraine, which can lead to the improvement of the properties of titanium alloys and the expansion of their use in various industries.

Keywords: nitriding in glow discharge, corrosion-mechanical wear resistance, titanium alloys

Постановка проблеми

Титан та титанові сплави широко використовуються у багатьох галузях промисловості завдяки їх високій міцності, легкості, винятковій корозійній стійкості та відмінним біосумісним властивостям. Втім, експлуатаційні умови в деяких застосуваннях вимагають ще більшого покращення зносостійкості та корозійної стійкості цих сплавів, що робить пошук ефективних методів їхнього удосконалення актуальною науковою та інженерною задачею.

Одним з перспективних методів підвищення зносостійкості та корозійної стійкості титанових сплавів є азотування в тліючому розряді, процес, який включає насичення поверхневого шару титану азотом при азотуванні в тліючому розряді. Цей метод має значно покращити механічні властивості титанових сплавів, зокрема їх твердість та стійкість до корозії, розширюючи тим самим можливість їх застосування.

Проте, необхідно глибше дослідити механізми, які лежать в основі зміцнення титанових сплавів під час азотування, а також вплив різних параметрів процесу на ефективність та однорідність нітридних покриттів. Крім того, важливо оцінити вплив азотування на довговічність та втомні характеристики титанових сплавів, що має критичне значення для їх застосування в критичних умовах експлуатації. У зв'язку з цим, постає проблема систематизації та аналізу наявних даних про ефективність азотування в тліючому розряді як методу підвищення корозійно-механічної зносостійкості титанових сплавів.

Мета роботи: головна мета цієї роботи полягає в огляді та аналізі сучасних досліджень, присвячених підвищенню корозійно-механічної зносостійкості титанових сплавів. Робота присвячена систематизації наявних досліджень в цій області та вивчення механізмів, які лежать в основі покращення корозійних властивостей титанових сплавів.

Виклад основного матеріалу

На сьогодні, титанові сплави мають широке застосування у різноманітних галузях промисловості, включаючи авіацію, медицину, машинобудування та багато інших, завдяки своєю малою питомою вагою, високою питомою міцністю та корозійною стійкістю [1]. Титанові сплави мають високу міцність і пластичність, малу густину, високу стійкість проти корозії та ерозії у морській воді, високу теплоємність, малу теплопровідність та малий коефіцієнт термічного розширення, низький модуль пружності. Так, промислові титанові сплави із $\sigma_b \approx 1000 \dots 1100$ МПа мають питому міцність у 1,7-1,8 разів більш високу, ніж сталі тієї ж міцності [2]. Також, титанові сплави широко використовуються в біомедицині завдяки свої біосумісності [3].

На поверхні титану легко утворюється стійка оксидна плівка, внаслідок чого титан володіє високим опором корозії у прісній та морській воді та в деяких кислотах, він стійкий проти кавітаційної корозії і під напругою [4]. В той же час титанові сплави схильні до поверхневого захоплення з іншими металами та мають низьку в умовах граничного та абразивного тертя. Проте, однією з основних проблем використання титанових сплавів є їхня відносна схильність до корозії та механічного зносу в агресивних середовищах, особливо при підвищених температурах [5]. У зв'язку з цим, пошук ефективних методів підвищення корозійно-механічної стійкості титанових сплавів стає актуальною задачею для багатьох науковців та інженерів. Саме тому виникла потреба у поверхневій модифікації титану та його сплавів для підвищення його фізико-механічних характеристик.

Усі методи модифікації поверхні титану та сплавів на його основі можна розділити на традиційні та високоенергетичні методи зміцнення. До традиційних методів зміцнення відносять: термічна обробка, пластична деформація поверхні, хіміко-термічна обробка при нормальному тиску та хіміко-термічна обробка в вакуумі. Високоенергетичні методи включають: азотування в тліючому розряді, фізичне осадження в вакуумі (PVD), електроіскрове та лазерне зміцнення [6, 7].

Класичне газове азотування застосовується для покращення поверхневих властивостей титанових сплавів, що дозволяє підвищити мікротвердість цих сплавів. Газове азотування відбувається при високих температурах, що призводить до зниження конструкційної міцності матеріалів. Грунтовний огляд наукових робіт в області газового азотування наведений в роботах Федірко В.М та Погрелюк І.М. [8].

Одним з перспективних методів інтенсифікації процесу поверхневого зміцнення титану та сплавів на його основі азотування в тліючому розряді. Основні результати по розробці наукових основ промислових технологій та устаткування для здійснення процесу азотування та основи теорії і практики безводневого азотування в тліючому розряді розроблені В.Г Каплуном та І.М Пастухом [9, 10]. Застосування азотування в тліючому розряді для модифікації поверхні титанових сплавів актуальне, оскільки дозволяє збільшити швидкість азотування в 10...15 разів у порівнянні з традиційним пічним азотуванням, а також скорочує енергетичні, матеріальні та інші ресурси [11].

Азотування в тліючому розряді впливає на комплекс властивостей, які визначають конструкційну міцність титанових сплавів [12]. Однією з головних цілей азотування в тліючому розряді титанових сплавів є створення поверхневого шару з високими антифрикційними властивостями. Наявність азоту в поверхневому шарі підвищує антифрикційні властивості пари тертя і перешкоджає її захопленню [13]. Проте ці якості набуваються іноді (азотування при високих температурах вище 9000С) ціною втрати механічних властивостей серцевини металу, особливо таких як міцність на втому, пластичність, в'язкість.

Азотування титанових сплавів при високих температурах застосовується лише для підвищення опору абразивному зношуванню при зберіганні корозійної стійкості матеріалу і геометричних параметрів деталей [14]. Цей метод модифікації поверхні використовується в основному для α - сплавів, які не зміцнені гартуванням і старінням.

Титанові сплави володіють високою корозійною стійкістю як до, так і після азотування в тліючому розряді [15-19]. Показано, що після високотемпературного азотування, корозійна стійкість титанових сплавів, оброблених в середовищі нерозбавленого азоту, вище, ніж сплавів азотованих у суміші азоту з аргонном. Це пояснюється тим, що в першому випадку формується нітридна зона більшої товщини, яка підвищує опір корозії титану [20]. У роботі [21] досліджена корозійна стійкість титанового сплаву Ti-6Al-4V в розчині азотної кислоти після іонного азотування при температурах 7000С та 9000С у азот-водневому середовищі. Корозійна стійкість шару Ti₂N більша ніж шару TiN. Товщина нітридного шару при 7000С досягала до 0,5 мкм, а при 9000С до 6 мкм, причому, за даними рентгеноструктурного аналізу було показано, що лише при 9000С з'являється фаза TiN. Проте, поверхнева нітридна фаза TiN розчиняється з часом в азотній кислоті швидше за Ti₂N.

Також значно покращує корозійну стійкість та зносостійкість матеріалу, збільшуючи його експлуатаційний термін і ефективність використання титанових сплавів при поєднанні методів обробки, а саме газового азотування та азотування в тліючому розряді. Перспективи формування корозійностійких нітридних шарів за допомогою послідовних процесів низькотемпературного азотування, а саме газового азотування та азотування в тліючому розряді досліджено у роботу [22, 23]. Дослідження показали, що

послідовне поєднання обох методів азотування призводить до формування структури TiN+Ti₂N+Ti(N), яка характеризується найкращими корозійними властивостями.

Титанові сплави володіють високою корозійною стійкістю як до, так і після азотування [24]. У роботі [19] відмічено, що після високотемпературного азотування, корозійна стійкість титанових сплавів, оброблених в середовищі нерозбавленого азоту, вище, ніж сплавів азотованих у суміші азоту з аргонем. Це пояснюється тим, що в першому випадку формується нітридна зона більшої товщини, яка підвищує опір корозії титану [25]. У роботі [21] досліджена корозійна стійкість титанового сплаву Ti-6Al-4V в розчині азотної кислоти після азотування в тліючому при температурах 7000C та 9000C у азот-водневому середовищі. Корозійна стійкість шару Ti₂N більша ніж шару TiN. Товщина нітридного шару при 7000C досягала до 0,5 мкм, а при 9000C до 6 мкм, причому, за даними рентгеноструктурного аналізу показано, що лише при 9000C з'являється фаза TiN. Проте, поверхнева нітридна фаза TiN розчиняється з часом в азотній кислоті швидше за Ti₂N.

У роботі [26] наведено результати дослідження морфології поверхні, мікроструктури, фазового та хімічного складу, а також корозійної стійкості азотованих шарів титанового сплаву Ti₆Al₂Cr₂Mo після процесів азотування за допомогою тліючого розряду при температурах 700°C, 800°C, 850°C. °C і 900 °C. Випробування показали підвищення корозійної стійкості азотованих шарів, виготовлених при температурі від 700°C до 850°C (підвищується разом із підвищенням температури обробки) порівняно з необробленим матеріалом.

Дослідження властивостей корозійної стійкості азотованого титанового сплаву Ti-6Al-4V у розчинах хлоридної кислоти без кисню у роботі [21, 27-29] показали, що азотуванням покращує не тільки зносостійкість титанових сплавів, але й їх стійкість до корозії при використанні концентрованих розчинів соляної кислоти. Показано, що при потенціалах, нижчих за 1000 мВ, окислення нітридного шару TiN, утвореного на азотованому титановому сплаві, відбувається дуже повільно, а анодні струми є нижчими, ніж пасивні (0,1 M HCl) або активно-пасивні (4 M HCl) струми необробленого сплаву в тих же розчинах. Руйнування нітридного шару, ймовірно, відбувається наступним чином: спочатку локальне розчинення нітридного шару в місцях дефектів призводить до проникнення розчину, а потім швидка корозія внутрішньої титанової матриці, посилена гальванічним зв'язком з шаром TiN, сприяє розтріскуванню та видаленню крихкого шару сполуки.

Також, у роботах [30 - 34] досліджено корозійну поведінку сплаву Ti-6Al-4V з нітридними покриттями в розчині Рінгера при 36 і 40°C. Корозійна стійкість сплаву Ti-6Al-4V з нітридними покриттями при температурі розчину 36°C визначається електрохімічною складовою механізму антикорозійної дії. Стійкість до корозії зростає зі збільшенням вмісту фази TiN в нітридному покритті. Корозійна стійкість сплаву Ti-6Al-4V з нітридними покриттями при температурі розчину 40°C особливо чутливий до якості азотованої поверхні. Стійкість до корозії зростає зі зниженням тиску азоту і температури насичення при азотуванні, що є адекватним забезпеченням високої якості азотована поверхня.

Застосування безводневого азотування для покращення зносостійкості сплаву TiZrAlV, та дані дослідження фазового складу, твердості, трибологічної поведінки та корозійні властивості азотованого сплаву TiZrAlV були систематизовані у роботі [35]. Показано, що на поверхні сплаву TiZrAlV було сформовано щільний шар товщиною 110 мкм, який головним чином містить фази TiN та Ti₂N. Поверхнева твердість нітридованого сплаву TiZrAlV становила 1437 HV, що в 4 рази вище, ніж у сплаву у вихідному стані. Формування фаз високої твердості нітридів призвело до значного покращення зносостійкості сплаву TiZrAlV після азотування. Більш того, корозійна стійкість нітридованого сплаву TiZrAlV, виміряна у розчинах 1 M HCl та 3,5 мас.% NaCl, була значно вища, а відносна частка втрати ваги після занурення в 2 M HCl розчин була знижена.

На мікротвердість, фазовий склад та зносостійкість азотованих титанових сплавів впливають режими азотування в тліючому розряді, які змінюються за керується 4-ма параметрами, такими як: температура, тиск, вміст газового середовища та тривалість азотування. У роботах [36-40] досліджено вплив усіх параметрів азотування та визначено оптимальні, які дають кращі показники зносостійкості азотованих титанових сплавів. Доведено, що саме низькотемпературне затопування в безводневому середовищі дозволяє уникнути водневого окрихчування поверхневого шару та дозволяє зберегти початкові механічні характеристики титанових сплавів.

Висновки

Узагальнюючи, можна сказати, що підвищення корозійно-механічної зносостійкості титанових сплавів за допомогою азотування в тліючому розряді є перспективним напрямком, що відкриває нові можливості для промисловості та науки. Прогрес у цій галузі залежить від подальших досліджень, інноваційних розробок та інтеграції новітніх технологій, які разом сприятимуть створенню більш довговічних, ефективних та екологічно безпечних матеріалів для широкого спектру застосувань.

Серед перспективних технологій, які можуть використовуватися для підвищення корозійно-механічних властивостей титанових сплавів, слід вважати низькотемпературне безводневе азотування в тліючому розряді. Застосування низькотемпературного безводневого азотування в тліючому розряді виключає ріст зерна основи та водневого окрихчування поверхні. Ефективне застосування цього процесу вимагає подальших теоретичних та експериментальних досліджень.

Сучасні дослідження відкривають нові можливості для покращення характеристик цих сплавів, що дає можливість розширити область їх застосувань. Загалом, підвищення корозійно-механічної стійкості

титанових сплавів методом азотування в тліючому розряді є перспективним напрямком досліджень в Україні, який може призвести до покращення властивостей титанових сплавів і розширення їхнього застосування в різних галузях промисловості.

Література

1. Турич В. В., Руткевич В. С. Матеріалознавство : Навчальний посібник. Вінниця : РВВ ВНАУ, 2012. 100 с.
2. Кшнякін В. С., Опанасюк А. С., Дядюра К. О. Основи фізичного матеріалознавства : навч. посіб. : у 2 ч. Суми : Сумський державний університет, 2015. Ч. 2. 291 с.
3. Brunette D. M., Tengvall P., Textor M., Thomsen P., Titanium in Medicine. *Springer-Verlag*. Berlin, Heidelberg, 2001. P. 1019.
4. Yang J., Song Y., Dong K., Han E. Research progress on the corrosion behavior of titanium alloys. *Corrosion Reviews*. 2023. Vol. 41, №. 1, P. 5-20.
5. Погрелюк І. М. Фізико-хімічні основи інтенсифікації процесу азотування титанових сплавів та конструювання зміцнених шарів з підвищеною зносо- та корозійною тривкістю: дис. ... док. техн. наук: 05.02.01. Львів, 2001. 320 с.
6. Zhecheva A., Sha W., Malinov S., Long A. Enhancing the microstructure and properties of titanium alloys through nitriding and other surface engineering methods. *Surface and Coatings Technology*. 2005. Vol. 200. I 7. P. 2192-2207.
7. Sarma B., Ravi Chandran K. S. Recent advances in surface hardening of titanium. *Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*. 2011. Vol. 63. P. 85–92
8. Федірко В. М., Погрелюк І. М. Азотування титану та його сплавів. Київ : Наук. думка, 1995. 220 с.
9. Пастух І. М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде. Харьков : ННЦ ХФТИ, 2006. 364 с.
10. Каплун В. Г. Научные основы технологии упрочнения деталей машин и инструмента ионным азотированием в безводородных средах: дис. ... док. техн. наук : 05.02.01. Хмельницький, 1992. 450 с.
11. Пастух І. М. Фізико-технічна обробка поверхні металів безводневим азотуванням в тліючому розряді: дис. ... док. тех. наук : 05.03.07. Київ, 2008. 520 с.
12. Mashovets N. S. Analysis of the influence of nitriding in a glow discharge on the properties of a titanium alloy. *Problems of Tribology*. 2019. Vol. 24 (3/93). P. 39-44.
13. Tamura Y., Yokoyama A., Watari F., Uo M., Kawasaki T. Mechanical Properties of Surface Nitrided Titanium for Abrasion Resistant Implant Materials. *Materials Transactions*. 2002. Vol. 43. No. 12. P. 3043-3051.
14. Rahman M., Reid I., Duggan P., Dowling D. P., Hughes G., Hashmi M. S. J. Structural and tribological properties of the plasma nitrided Ti-alloy biomaterials: Influence of the treatment temperature. *Surface and Coatings Technology*. 2007. V. 201 (9–11). P. 4865–4872.
15. Gokul Lakshmi S., Raman V., Rajendran N., Babi M. A. K., Avivuoli D. In vitro corrosion Ti-6Al-7Nb orthopedic alloy in Hanks solution. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2003. Vol. 4 (5). P. 415–418.
16. Galvanetto E., Galliano F. P., Fossati A., Borgioli F. Corrosion resistance properties of plasma nitrided Ti-6Al-4V alloy in hydrochloric acid solutions. *Corrosion Science*. 2002. Vol. 44. Is. 7. P. 1593–1606.
17. Rossi S., Fedrizzi L., Bacci T., Pradelli G. Corrosion behaviour of glow discharge nitrided titanium alloys. *Corrosion Science*. 2003. Vol. 45. Is. 3. P. 511–529.
18. Galliano F., Mischler S., Landolt D. Tribocorrosion behavior of plasma nitrided Ti-6Al-4V alloy in neutral NaCl solution. *Surface and Coating Technology*. 2001. Vol. 145. Is. 1-3. P. 121–131.
19. Fernandes A. C., Vaz F., Ariza E. [et al.] Tribocorrosion behaviour of plasma nitrided and plasma nitrided+oxidised Ti6Al4V alloy. *Surface and Coatings Technology*. 2006. V. 200. P. 218–224.
20. Rolinski E. Surface properties of plasma nitrided titanium alloys. *Materials Science and Engineering A*. 1989. № 108. P. 37–44.
21. Fossati A., Borgioli F., Galvanetto E., Bacci T. Corrosion resistance properties of plasma nitrided Ti-6Al-4V alloy in nitric acid solutions. *Corrosion Science*. 2004. V. 46. P. 917–927.
22. Pohrelyuk I., Yaskiv O., Mashovets N. Formation of corrosion resistant nitride layers through sequentially combination of nitriding methods. Фізико-хімічна механіка матеріалів : Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів: в 2-х т. №7. Львів : Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2008. Т. 1. С. 272–276.
23. Погрелюк І. М., Яськів О. І., Пастух І. М., Машовець Н. С. Формування зносостійких нітридних шарів при комбінованому азотуванні. Проблеми трибології. 2006. №4. С. 113–116.
24. Hammond, Ali Sabea, et al. Corrosion Behavior Evaluation in Simulated Body Fluid of a Modified Ti-6Al-4V Alloy by DC Glow Plasma Nitriding. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*. 2019. Vol. 5 (4). P. 1–8.
25. Shen H. Wang, L. Corrosion resistance and electrical conductivity of plasma nitrided titanium. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46, P. 11084–11091.
26. Brojanowska A., Borowski T., Połowski K., Salach J., Sobiecki J. R. Influence of glow discharge assisted nitriding processes temperature on corrosion resistance of layers made of Ti6Al2Cr2Mo titanium alloy. *Inżynieria Materiałowa*. 2014. Vol. 35 (2). P. 92–96.

27. Galvanetto E., Galliano F. P., Fossati A., Borgioli F. Corrosion resistance properties of plasma nitride Ti-6Al-4V alloy in hydrochloric acid solutions. *Corrosion Science*. 2002. Vol. 44. Is. 7. P. 1593–1606.
28. Rossi S., Fedrizzi L., Bacci T., Pradelli G. Corrosion behaviour of glow discharge nitrided titanium alloys. *Corrosion Science*. 2003. Vol. 45. P. 511–529.
29. Oliveira V. M. C. A., Aguiar C., Vazquez A. M., Robin A., Barboza M. J. R. Improving corrosion resistance of Ti-6Al-4V alloy through plasma-assisted PVD deposited nitride coatings. *Corrosion Science*. 2014. Vol. 88. P. 317–327.
30. 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.
31. Rossi S., Fedrizzi L., Bacci T., Pradelli G. Corrosion behaviour of glow discharge nitrided titanium alloys. *Corrosion Science*. 2003. Vol. 45. P. 511–529.
32. Manhabosco T. M., Tamborim S. M., Santos C. B., Müller I. L. Tribological, electrochemical and tribo-electrochemical characterization of bare and nitrided Ti6Al4V in simulated body fluid solution. *Corrosion Science*. 2011. Vol. 53. P. 1786–1793.
33. Cvijovic-Alagic I., Cvijovic Z., Mitrovic S., Panic V., Rakin M. Wear and corrosion behaviour of Ti-13Nb-13Zr and Ti-6Al-4V alloys. *Corrosion Science*. 2011. Vol. 53. P. 796–808.
34. Bo Tian, Dong Bai Xie, Fu Hui Wang. Corrosion behavior of TiN and TiN/Ti composite films on Ti6Al4V alloy in Hank's solution. *Journal of Applied Electrochemistry*. 2009. Vol. 39. P. 447–453
35. Lv J. W., Ai X. Y., Zhang B., Jing Q. Hydrogen-Free Plasma Nitriding to Enhance Wear and Corrosion Resistance of TiZrAlV alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2023. № 1. P. 54–63.
36. Pastukh I.M., Mashovets N.S., Shalapkо Yu.I., Kurskaja V.A. Forecast the formation of nitrides on the surface of titanium alloys during nitriding in a glow discharge. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2014. Vol. 62 (2). P. 53–62.
37. Mashovets N. S., Pastukh I. M., Voloshko S. M. Aspects of the practical application of titanium alloys after low temperature nitriding glow discharge in hydrogen free gas media. *Applied Surface Science*. 2017. Vol. 392. P. 356–361.
38. Mashovets N. S. Analysis of the influence of nitriding in a glow discharge on the properties of a titanium alloy. *Problems of Tribology*. 2019. Vol. 24 (3/93). P. 39–44.
39. Kashaev N., Stock H.-R., Mayr P. Nitriding of Ti-6%Al-4%V alloy in the plasma of an intensified glow discharge. *Metal Science and Heat Treatment*. 2004. Vol. 46. P. 294–298.
40. Kashaev N., Stock H.-R., Mayr P. Assessment of the application potential of the intensified glow discharge for industrial plasma nitriding of Ti-6Al-4V. *Surface and Coatings Technology*. 2005. Vol. 200. P. 502–506.

References

1. Turych V. V., Rutkevych V. S. *Materialoznavstvo : Navchalnyi posibnyk*. Vinnytsia: RVV VNAU. 2012. 100 c.
2. Kshniakin V. S., Opanasiuk A. S., Diadiura K. O. *Osnovy fizychnoho materialoznavstva : navch. posib. : u 2 ch*. Sumy : Sumskyi derzhavnyi universytet. 2015. Ч. 2. 291 c.
3. Brunette D. M., Tengvall P., Textor M., Thomsen P., *Titanium in Medicine*. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, 2001. P. 1019.
4. Yang J., Song Y., Dong K., Han E. Research progress on the corrosion behavior of titanium alloys. *Corrosion Reviews*. 2023. Vol. 41, № 1, P. 5-20.
5. Pohreliuk I. M. *Fizyko-khimichni osnovy intensyfikatsii protsesu azotuvannia tytanovykh splaviv ta konstruiuvannia zmitsnennykh shariv z pidvyshchenoiu znoso- ta koroziinoiu tryvkistiui: dys. ... dok. tekhn. nauk : 05.02.01*. Lviv, 2001. 320 c.
6. Zhecheva A., Sha W., Malinov S., Long A. Enhancing the microstructure and properties of titanium alloys through nitriding and other surface engineering methods. *Surface and Coatings Technology*. 2005. Vol. 200. I 7. P. 2192-2207.
7. Sarma B., Ravi Chandran K. S. Recent advances in surface hardening of titanium. *Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*. 2011. Vol. 63. P. 85–92
8. Fedirko V. M., Pohreliuk I. M. *Azotuvannia tytanu ta yoho splaviv*. Kyiv : Nauk. dumka, 1995. 220 c.
9. Pastukh Y. M. *Teoriya y praktyka bezvodородного азотирования в тлеющем разряде*. Kharkov : NNTs KhFTY, 2006. 364 c.
10. Kaplun V. H. *Научные основы технологии улучшения деталей машин и инструмента новым азотированием в безводородных средах: dys. ... dok. tekhn. nauk : 05.02.01*. Khmelnytskyi, 1992. 450 c.
11. Pastukh I. M. *Fizyko-tekhnichna obrobka poverkhnii metaliv bezvodnym азотированием в тлеющем разряде: dys. ... dok. tekhn. nauk : 05.03.07*. Kyiv, 2008. 520 s.
12. Mashovets N. S. Analysis of the influence of nitriding in a glow discharge on the properties of a titanium alloy. *Problems of Tribology*. 2019. Vol. 24 (3/93). P. 39-44.
13. Tamura Y., Yokoyama A., Watari F., Uo M., Kawasaki T. Mechanical Properties of Surface Nitrided Titanium for Abrasion Resistant Implant Materials. *Materials Transactions*. 2002. Vol. 43. No. 12. P. 3043-3051.
14. Rahman M., Reid I., Duggan P., Dowling D. P., Hughes G., Hashmi M. S. J. Structural and tribological properties of the plasma nitrided Ti-alloy biomaterials: Influence of the treatment temperature. *Surface and Coatings Technology*. 2007. V. 201 (9–11). P. 4865–4872.
15. Gokul Lakshmi S., Raman V., Rajendran N., Babi M. A. K., Avivuoli D. In vitro corrosion Ti-6Al-7Nb orthopedic alloy in Hanks solution. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2003. Vol. 4 (5). P. 415–418.
16. Galvanetto E., Galliano F. P., Fossati A., Borgioli F. Corrosion resistance properties of plasma nitrided Ti-6Al-4V alloy in hydrochloric acid solutions. *Corrosion Science*. 2002. Vol. 44. Is. 7. P. 1593–1606.
17. Rossi S., Fedrizzi L., Bacci T., Pradelli G. Corrosion behaviour of glow discharge nitrided titanium alloys. *Corrosion Science*. 2003. Vol. 45. Is. 3. P. 511–529.
18. Galliano F., Mischler S., Landolt D. Tribocorrosion behavior of plasma nitrided Ti-6Al-4V alloy in neutral NaCl solution. *Surface and Coating Technology*. 2001. Vol. 145. Is. 1-3. P. 121–131.
19. Fernandes A. C., Vaz F., Ariza E. [et al.] Tribocorrosion behaviour of plasma nitrided and plasma nitrided+oxidised Ti6Al4V alloy. *Surface and Coatings Technology*. 2006. V. 200. P. 218–224.
20. Rolinski E. Surface properties of plasma nitrided titanium alloys. *Materials Science and Engineering A*. 1989. № 108. P. 37–44.

21. Fossati A., Borgioli F., Galvanetto E., Bacci T. Corrosion resistance properties of plasma nitrided Ti–6Al–4V alloy in nitric acid solutions. *Corrosion Science*. 2004. V. 46. P. 917–927.
22. Pohrelyuk I., Yaskiv O., Mashovets N. Formation of corrosion resistant nitride layers through sequentially combination of nitriding methods. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv : Problemy korozii ta protykoroziihnoho zakhystu materialiv: v 2-kh t. №7*. Lviv : Fizyko-mekhanichnyi instytut im. H.V. Karpenka NAN Ukrainy, .2008. T. 1. C. 272–276.
23. Pohreliuk I. M., Yaskiv O. I., Pastukh I. M., Mashovets N. S. Formuvannya znosostiikykh nitrydnykh shariv pry kombinovanomu azotuvanni. *Problemy trybolohii*. 2006. №4. C. 113–116.
24. Hammood, Ali Sabea, et al. Corrosion Behavior Evaluation in Simulated Body Fluid of a Modified Ti–6Al–4V Alloy by DC Glow Plasma Nitriding. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*. 2019. Vol. 5 (4). P. 1–8.
25. Shen H. Wang, L. Corrosion resistance and electrical conductivity of plasma nitrided titanium. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46, P. 11084–11091.
26. Brojanowska A., Borowski T., Połowski K., Salach J., Sobiecki J. R. Influence of glow discharge assisted nitriding processes temperature on corrosion resistance of layers made of Ti6Al2Cr2Mo titanium alloy. *Inżynieria Materiałowa*. 2014. Vol. 35 (2). P. 92–96.
27. Galvanetto E., Galliano F. P., Fossati A., Borgioli F. Corrosion resistance properties of plasma nitride Ti–6Al–4V alloy in hydrochloric acid solutions. *Corrosion Science*. 2002. Vol. 44. Is. 7. P. 1593–1606.
28. Rossi S., Fedrizzi L., Bacci T., Pradelli G. Corrosion behaviour of glow discharge nitrided titanium alloys. *Corrosion Science*. 2003. Vol. 45. P. 511–529.
29. Oliveira V. M. C. A., Aguiar C., Vazquez A. M., Robin A., Barboza M. J. R. Improving corrosion resistance of Ti–6Al–4V alloy through plasma-assisted PVD deposited nitride coatings. *Corrosion Science*. 2014. Vol. 88. P. 317–327.
30. 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.
31. Rossi S., Fedrizzi L., Bacci T., Pradelli G. Corrosion behaviour of glow discharge nitrided titanium alloys. *Corrosion Science*. 2003. Vol. 45. P. 511–529.
32. Manhabosco T. M., Tamborim S. M., Santos C. B., Müller I. L. Tribological, electrochemical and tribo-electrochemical characterization of bare and nitrided Ti6Al4V in simulated body fluid solution. *Corrosion Science*. 2011. Vol. 53. P. 1786–1793.
33. Cvijovic-Alagic I., Cvijovic Z., Mitrovic S., Panic V., Rakin M. Wear and corrosion behaviour of Ti–13Nb–13Zr and Ti–6Al–4V alloys. *Corrosion Science*. 2011. Vol. 53. P. 796–808.
34. Bo Tian, Dong Bai Xie, Fu Hui Wang. Corrosion behavior of TiN and TiN/Ti composite films on Ti6Al4V alloy in Hank’s solution. *Journal of Applied Electrochemistry*. 2009. Vol. 39. P. 447–453
35. Lv J. W., Ai X. Y., Zhang B., Jing Q. Hydrogen-Free Plasma Nitriding to Enhance Wear and Corrosion Resistance of TiZrAlV alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2023. № 1. P. 54–63.
36. Pastukh I.M., Mashovets N.S., Shalapko Yu.I., Kurskaja V.A. Forecast the formation of nitrides on the surface of titanium alloys during nitriding in a glow discharge. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2014. Vol. 62 (2). P. 53–62.
37. Mashovets N. S., Pastukh I. M., Voloshko S. M. Aspects of the practical application of titanium alloys after low temperature nitriding glow discharge in hydrogen free gas media. *Applied Surface Science*. 2017. Vol. 392. P. 356–361.
38. Mashovets N. S. Analysis of the influence of nitriding in a glow discharge on the properties of a titanium alloy. *Problems of Tribology*. 2019. Vol. 24 (3/93). P. 39–44.
39. Kashaev N., Stock H.-R., Mayr P. Nitriding of Ti-6%Al-4%V alloy in the plasma of an intensified glow discharge. *Metal Science and Heat Treatment*. 2004. Vol. 46. P. 294–298.
40. Kashaev N., Stock H.-R., Mayr P. Assessment of the application potential of the intensified glow discharge for industrial plasma nitriding of Ti-6Al-4V. *Surface and Coatings Technology*. 2005. Vol. 200. P. 502–506.