

УДК 621. 432

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.41-47](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.41-47)**А.В. Рутковський**, ст. наук. співр., канд. техн. наук*Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренко НАН України, м. Київ, Україна**e-mail: coating@ipp.kiev.ua***С.І. Маркович**, доц., канд. техн. наук, **С.О. Магопець**, доц.канд. техн. наук,**В.С. Маркович**, здобувачка третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: marko60@ukr.net, e-mail: magserg@ukr.net, e-mail: markovich241082@gmail.com*

Зносостійкість титанового сплаву ВТ1-0 з модифікованою поверхнею в умовах абразивного впливу

В роботі проведено дослідження зносостійкості титанового сплаву ВТ1-0 з модифікованою поверхнею в умовах абразивного впливу. Для проведення вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі і формування дифузійних шарів на поверхні використовувалася універсальна установка «ВПА-1» Технологічні параметри вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі: температура – 550°C, тиск – 25-150 Па, час обробки – 10 годин, співвідношення реакційних газів – 80% Ar + 20% N₂. Дослідження зносостійкості проводили по схемі зношування вільним абразивом (метод Брінеля) відповідно до ГОСТ 23.208-79 та американського стандарту ASTM C 6568. Експеримент проводили при швидкості ковзання 0,158 м/с, навантаженні 20 кг (при плечі 272 мм) та шляху тертя 50 м. В якості еталону використовувалась сталь 45, загартована до твердості 480-500 НВ. Тілом для зношування служив диск із титанового сплаву ВТ1-0 діаметром 100 мм і товщиною 3,5 мм. В результаті дослідження встановлено що максимальна інтенсивність зношування титанового сплаву ВТ1-0 без зміцнення; вплив термоциклічного азотування підвищує зносостійкість сплаву ВТ1-0: у піску – 3 рази; у воді + пісок – 3,5 рази; у солі + пісок – 2,5 рази; вплив ізотермічного азотування підвищує зносостійкість сплаву ВТ1-0: у піску – 4 рази; у воді + пісок – 3,5 рази; у солі + пісок – 2,5 рази.

іонне азотування, імпульсний режим, титановий сплав, зносостійкість, вільний абразив

Постановка проблеми. Витрати відновлення деталей машин у результаті зносу величезні і щорічно збільшуються. На симпозіумі, проведеному США щодо зниження зносу у техніці, загальна думка звелася до того, що управління зношуванням є центральною ланкою у вирішенні таких національних проблем, як економія енергії, скорочення витрат матеріалів, забезпечення надійності та безпеки механічних систем [1]. Проблема зносостійкості є актуальною і для України, і насамперед у зв'язку зі значним зносом обладнання та техніки, відсутністю коштів на його відновлення та реконструкцію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Азотування значно підвищує зносостійкість металів і сплавів [2-3]. Основними споживачами технології вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі є автомобільні, тракторні, авіаційні, суднобудівні та судноремонтні, машино- та верстатобудівні заводи, заводи з виробництва сільськогосподарської техніки, насосного та компресорного обладнання, шестерень, підшипників, алюмінієвих профілів, енергетичних установок та ін. [3]. Наявність азоту в поверхневому шарі підвищує антифрикційні властивості пари тертя і перешкоджає схоплюванню при терті [4,5]. Застосування комбінованих методів азотування для формування зносостійких покриттів на титанових сплавах [6] збільшує

зону внутрішнього азотування і не дозволяє значно збільшити товщину нітридної зони і як наслідок, значно збільшити зносостійкість пари тертя, зокрема зносостійкість в абразивному середовищі та при сухому терті. В середовищі мастила висока твердість не є критерієм високої зносостійкості пари тертя. В цих умовах тертя необхідне оптимальне співставлення між твердістю і пластичністю азотованого шару.

Найважливішою метою азотування являється підвищення зносостійкості деталей [6-8]. Азотування забезпечує високу зносостійкість при абразивному зношуванні титанових сплавів. Зносостійкість зони внутрішнього азотування є значно меншою в порівнянні з нітридною зоною [7].

При дифузійному насиченні поверхні титанових сплавів азотом у тліючому розряді утворюються тверді розчини втілення, адже атомний радіус азоту складає 0,071 нм, що є приблизно у два рази менше, ніж у атомів титану [8]. Особливістю зміцнення при утворенні розчинів втілення є висока рухливість міжвузловин при порівняно низьких температурах. Взаємодія пружних полів, пов'язана з між вузловими атомами, дислокаціями, іншими дефектами кристалічної будови, призводить до направленої міграції міжвузловин та захвату домішок дефектами будови. Це сприяє гальмуванню дислокацій та зміцненню матеріалу. [9]

Як відомо, найбільшу небезпеку з точки зору забезпечення високого рівня зносостійкості титанових сплавів являють собою залишкові напруження розтягу. Вони сприяють розвитку при поверхневих тріщин, проникненню молекул зовнішнього середовища у витоки мікротріщин та прискорюють дифузію атомів домішків. У випадку дифузійного насичення поверхні азотом у тліючому розряді, упроваджений у матрицю атом азоту розсуває сусідні атоми, створюючи залишкові напруження стиску [7-9]. Ці напруження ефективно зберігають поверхню від руйнування напруженнями розтягу, які виникають при терті у задній області плям фактичного контакту та порівнюються за рівнем із характеристиками міцності матеріалів.

Обробка вакуумним іонним азотуванням в імпульсному режимі значно впливає на хімічні та адгезійні властивості поверхні зміцнених титанових сплавів. Утворення хімічних сполук у титанових сплавах за рахунок впровадження азоту або підвищення межі його концентрації змінює швидкість хімічних реакцій та кінетику зростання оксидних плівок, підвищує їх зчеплення з основою. Це призводить до зменшення інтенсивності утворення адгезійних вузлів схоплювання та сприяє покращенню трибологічних характеристик титанових сплавів [8-10].

Постановка завдання. Провести дослідження титанового сплаву зі зміцненим азотованим шаром для отримання експериментальних результатів щодо визначення закономірності впливу параметрів дифузійного насичення на зносостійкість в умовах абразивного впливу.

Виклад основного матеріалу. Для проведення вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі і формування дифузійних шарів на поверхні використовувалася універсальна установка «ВІПА-1» (рис. 1), розроблена в Інституті проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України. Технологічне обладнання виконано в класичному для іонного азотування двокамерному варіанті. Розміри деталей, що обробляють, до Ø 500 при висоті до 1400 мм.

Обробка в циклічному тліючому розряді відбувалась у вакуумній камері без додаткових нагріваючих пристроїв. Вакуумне іонне азотування в імпульсному режимі проводилось у режимі циклічної зміни температури, яка здійснюється періодичним включенням-вимиканням тліючого розряду у вакуумній камері.

Технологічні параметри вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі: температура – 550°C, тиск – 25-150 Па, час обробки – 10 годин, співвідношення

реакційних газів – 80% Ar + 20% N₂. Для експериментальних досліджень використовували зразки із титаного сплаву VT1-0 з розмірами 30x30 мм та товщиною 5 мм. Зміцнення поверхонь зразків відбувалося рівномірно по всьому периметру, що забезпечує рівномірну товщину дифузійного шару.



Рисунок 1 – Загальний вид установки ВПА-1

Джерело: Розроблено авторами

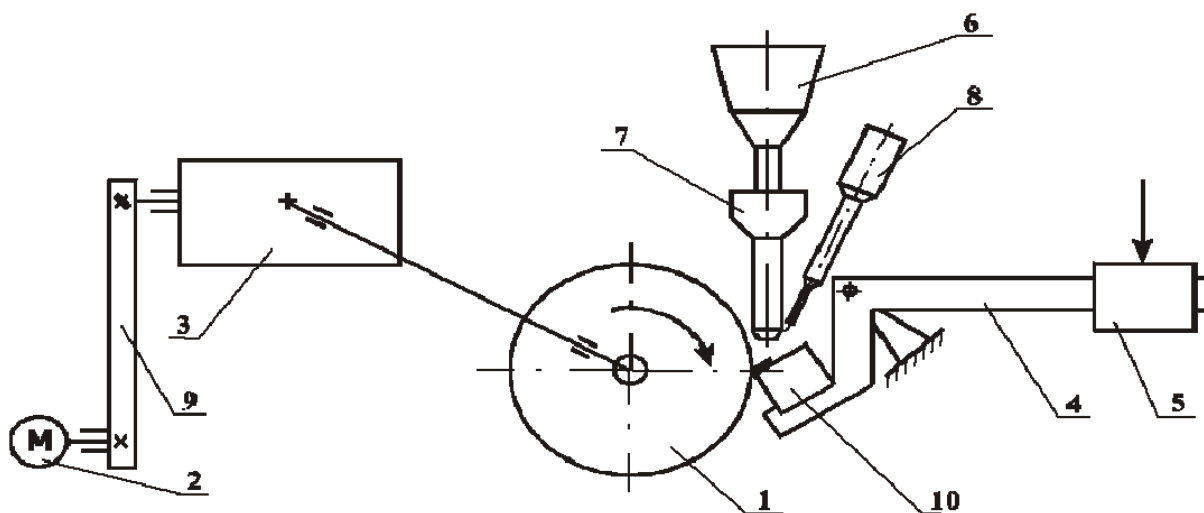
Дослідження зносостійкості зміцнених поверхневих шарів проводяться в три етапи: лабораторні, стендові і натурні (експлуатаційні дослідження) декілька методами з метою отримання достовірних результатів.

Аналіз умов експлуатації тертьових поверхонь більшості елементів конструкцій дозволив використовувати для стендових досліджень установку по схемі зношування вільним абразивом (метод Брінеля). Випробування на зношування проводили на експериментальній установці відповідно до ГОСТ 23.208-79 (рис. 2). Процес тертя моделювався у присутності вільного не жорстко закріпленого абразиву, що збігається з американським стандартом ASTM C 6568.

Експеримент проводили при швидкості ковзання 0,158 м/с, навантаженні 20 кг (при плечі 272 мм) та шляху тертя 50 м. В якості еталону використовувалась сталь 45, загартована до твердості 480-500 НВ. Тілом для зношування служив диск із титанового сплаву VT1-0 діаметром 100 мм і товщиною 3,5 мм. Після кожного циклу іспитів проводилась заміна диска. Для кожного зразка виконувались 3-кратні іспити.

В якості абразива використовувався кварцевий пісок (SiO₂) зернистістю 200...250 мкм. Перед випробуванням абразив просували (вологість не перевищувала 0,16%). Навантаження на зразок складало 150 Н, час одного іспиту 300 с. Витрати абразиву – $15-17 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3$.

В установці частки абразиву, захоплювані диском який обертається, витирають лунку на кожній кромці зразка, який притискається з певним зусиллям до циліндричної поверхні диска (рис. 2).



1 – диск; 2 – електродвигун; 3 – редуктор; 4 – важіль; 5 – тягар; 6 – бункер; 7 – лійка;
8 – посудина; 9 – пасова передача; 10 – зразок

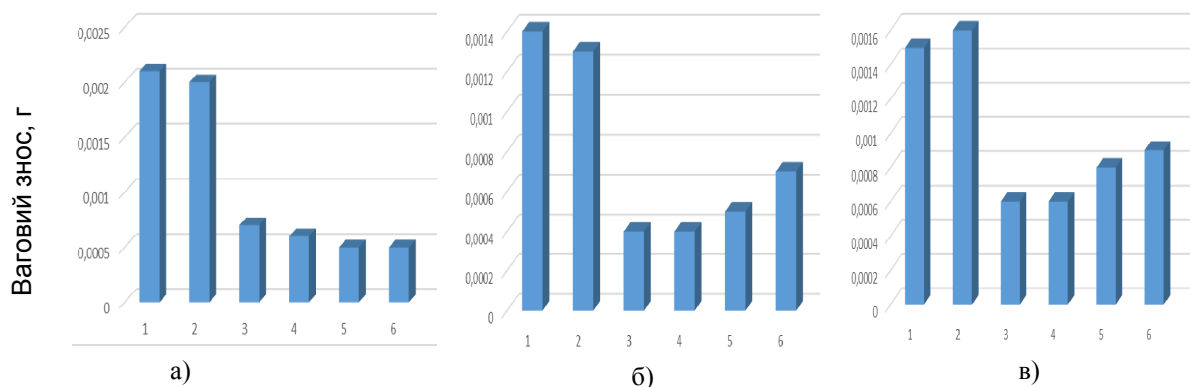
Рисунок 2 – Схема установки для стендових досліджень зміцнених зразків із титанових сплавів
Джерело: Розроблено авторами

Диск (1) встановлений на горизонтальній вісі і приводиться в обертання від електродвигуна (2) через редуктор (3). Редуктор (3) з'єднаний з електродвигуном (2) при допомозі пасової передачі (9). Диск виготовлений із титанового сплаву VT1-0. Швидкість обертання диску ($0,37 \text{ сек}^{-1}$) вибиралась із умови усунення підвищеного нагрівання при терті. Зразок (10) кріпиться на площадці Г-подібного важеля (4) і притискається до диска (1) з зусиллям, яке створюється тягарем (5), який може переміщатися по важелю (4). Абразив поступає із бункера (6) в лійку (7), а звідти до поверхні тертя.

Для всіх модельних систем спільним являється те, що зношування визначається через визначений час шляхом зважування. В результаті визначається швидкість зношування, яка є типовою для вибраної пари при заданих умовах. Зношування заміряли ваговим методом на аналітичних вагах АДВ - 200 з точністю до $0,0001 \text{ р}$. До і після випробувань зразки промивали в етиловому спирті, просушували і зважували.

Для порівняння на зносостійкість використовувалися зразки з титанового сплаву VT1-0 до і після азотування. Як середовище використовували: 1 - кварцовий пісок, 2 - вода + пісок, 3 - волога сіль + пісок. Додатково дослідження проводилися в середовищі: вода + кварцовий пісок, волога сіль + кварцовий пісок. Зернистість кварцового піску та умови проведення експериментальних досліджень відповідали попереднім.

Розмір ΔV (кг) визначалася як різниця в масі зразка до і після випробувань. Результати експериментальних досліджень представлені на рис. 3.



а) пісок; б) вода + пісок; в) сіль + пісок:

1 – без зміцнення; 2 – термоциклічний режим азотування; 3 – ізотермічний режим азотування

Рисунок 3 – Вагове зношування зразків у середовищі

Джерело: Розроблено авторами

Таким чином, вакуумне іонне азотування в імпульсному режимі забезпечує високу зносостійкість при абразивному зношуванні титанових сплавів, при цьому високу зносостійкість мають шари оброблені термоциклічним режимом азотування, а найбільшу інтенсивність зношування у титанового сплаву без азотування.

На підставі проведених експериментальних досліджень встановлено, що основними механізмами підвищення зносостійкості титанових сплавів внаслідок застосування процесу дифузійного насичення поверхні азотом при вакуумним іонним азотуванням в імпульсному режимі є: зміцнення поверхневих шарів; створення сприятливої схеми залишкових напружень; зміна закономірностей деформування поверхневих шарів; зміна хімічних та адгезійних властивостей поверхні; перенесення дифундуючих атомів азоту у глибину матриці під час тертя внаслідок ефекту “трибодиффузії”.

Відносно невелика глибина проникнення іонів азоту не може розглядатися як фактор, що обмежує можливості цього різновиду обробки щодо підвищення зносостійкості, адже реалізація таких перспективних режимів тертя, як вибіркоче перенесення або ефект аномально низького тертя, пов'язана із модифікуванням поверхневих шарів субмікронної товщини. До того ж, експериментально встановлено, що підвищену зносостійкість можуть мати шари, товщина яких у декілька разів перевищує іонноазотовану область.

Зміцнення поверхневих шарів титанових сплавів відбувається за наступними можливими механізмами, вклад яких залежить від різних факторів (температури титанового сплаву, параметрів процесу вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі, тощо):

- деформаційне зміцнення при пластичній зміні форми іонноазотованого шару;
- зміцнення за рахунок утворення твердих розчинів, які утворюють енергетичний бар'єр та утруднюють переміщення дислокацій;
- утворення структур зі зміцнюючими фазами (нітридів, карбонітридів, тощо), що викликають дисперсійне твердіння;
- блокування дислокацій за рахунок спотворення кристалічної ґратки, обумовлене об'ємною невідповідністю впроваджених атомів та появою виділень та пор;
- гальмування дислокацій упровадженими елементами (атомами, комплексами) та радіаційними ефектами;
- зменшення розмірів зерен, що призводить до збільшення площі міжзеренних границь та перешкоджає руху дислокацій.

Висновки. 1. Максимальна інтенсивність зношування титанового сплаву VT1-0 без зміцнення.

2. Вплив термоциклічного азотування підвищує зносостійкість сплаву VT1-0: у піску – 3 рази; у воді + пісок – 3,5 рази; у солі + пісок – 2,5 рази.

3. Вплив ізотермічного азотування підвищує зносостійкість сплаву VT1-0: у піску – 4 рази; у воді + пісок – 3,5 рази; у солі + пісок – 2,5 рази.

Список літератури

1. Nazmy M., Staubli M. Alloy modification of γ TiAl for improved mechanical properties. *Scr. met. Et mater.* 1994. Vol. 31, №7. P. 829-833.

2. Гогаєв К.О., Радченко О.К. Деформування титанових сплавів прокатуванням. *Металознавство та обробка металів*. 2001. №4. С. 25–29.
3. Федорак Р.М. Дифузійне залізнення та цементация титану. *Металознавство та обробка металів*. 1998. №4. С. 52–55.
4. Шалапко Ю.І., Гончаров В.В. Підвищення антифрикційних властивостей титанового сплаву ОТ4 при лазерному опромінюванні поверхні. *Вісник Технологічного університету Поділля*. 1999. № 6. С. 177–178.
5. Gurrappa I. Effect of aluminizing on the oxidation of the titanium alloy, IMI 834. *Oxidation of Metals*. 2001. 56, №1-2. P. 73-87.
6. Yue T.M., Cheung T.M., Man H.C. The effects of laser surface treatment on the corrosion properties of Ti-6Al-4V alloy in Hank's solution. *Journal Materials Science Letters*. 2000. Vol. 19, №3. P. 205–208.
7. Федірко В., Яськів О., Пригула А. Азотування і борування титанових сплавів - перспективи комбінованого оброблення. *Машинознавство*. 2003. №4. С. 23–26.
8. Ляшенко Б.А., С.І. Маркович, Михайлюта С.С. Розробка технологічного процесу вакуумного азотування поршнів двигунів в пульсуючому пучку плазми. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2017. Вип. 47, ч. 1. С. 158-166.
9. Рутковський А. В., Маркович С.І., Михайлюта С.С. Аналіз напружено-деформованого стану іонноазотованих зразків із покриттям в умовах ізотермічної та термоциклічної повзучості. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 6(37), ч. I. С. 3-9.
10. Рутковський А.В., Маркович С.І., Михайлюта С.С. Теплостійкість іонноазотованих алюмінієвих сплавів при ізотермічному та термоциклічному впливі. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2020. Вип. 3(34). С. 72-81.

References

1. Nazmy, M. & Staubli, M. (1994). Alloy modification of γ TiAl for improved mechanical properties. *Scr. met. Et mater, Vol.31, №7*, P. 829-833 [in English].
2. Hohaiev, K.O. & Radchenko, O.K. (2001). Deformuvannya tytanovykh splaviv prokatuvanniam [Deformation of titanium alloys by rolling]. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv - Metallurgy and metal processing, 4*, 25–29 [in Ukrainian].
3. Fedorak, R.M. (1998). Dyfuzijne zaliznennia ta tsementatsiia tytanu [Diffusion fertilization and cementation of titanium]. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv - Metallurgy and metal processing, 4*, 52–55 [in Ukrainian].
4. Shalapko, Yu.I. & Honcharov, V.V. (1999). Pidvyschennia antyfrityksijnykh vlastyvostej tytanovoho splavu OT4 pry lazernomu oprominiuvanni poverkhni [Increasing the antifriction properties of the OT4 titanium alloy during laser irradiation of the surface]. *Visnyk Tekhnolohichnoho universytetu Podillia - Bulletin of the Technological University of Podillia, 6*, 177–178 [in Ukrainian].
5. Gurrappa, I. (2001). Effect of aluminizing on the oxidation of the titanium alloy, IMI 834. *Oxidation of Metals, 56, 1-2*, 73-87 [in English].
6. Yue, T.M., Cheung, T.M. & Man, H.C. (2000). The effects of laser surface treatment on the corrosion properties of Ti-6Al-4V alloy in Hank's solution. *Journal Materials Science Letters, Vol.19, No.3*, P.205–208 [in English].
7. Fedirko, V., Yas'kiv, O. & Prytula, A. (2003). Azotuvannia i boruvannia tytanovykh splaviv - perspektyvy kombinovanoho obroblennia [Nitriding and boronizing of titanium alloys - prospects for combined processing]. *Mashynoznavstvo - Mechanical science, 4*, 23–26 [in Ukrainian].
8. Liashenko, B.A., Markovych, S.I. & Mykhajliuta, S.S. (2017). Rozrobka tekhnolohichnoho protsesu vakuumnoho azotuvannia porshniv dvyhunyv v pul'suiuchomu puchku plazmy [Development of a technological process of vacuum nitriding of engine pistons in a pulsating plasma beam]. *Zahal'noderzhavnyj mizhvidomchyj nauково-tekhnichnyj zbirnyk. Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil's'kohospodars'kykh mashyn. All-state interdepartmental scientific and technical collection. Design, production and operation of agricultural machines, 47, 1*, 158-166 [in Ukrainian].
9. Rutkovs'kyj, A. V., Markovych, S.I. & Mykhajliuta, S.S. (2022). Analiz napruzhenno-deformovanoho stanu ionnoazotovanykh zrazkiv iz pokryttiam v umovakh izotermichnoi ta termotsyklichnoi povzuchosti [Analysis of the stress-strain state of ion-nitrogenized coated samples under isothermal and thermocyclic creep conditions]. *Tsentral'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky - Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences, 6(37), 1*, 3-9 [in Ukrainian].
10. Rutkovs'kyj, A. V., Markovych, S.I. & Mykhajliuta, S.S. (2020). Teplostyjkist' ionnoazotovanykh aliuminiievnykh splaviv pry izotermichnomu ta termotsyklichnomu vplyvi [Heat resistance of ion-nitrogenized aluminum alloys under isothermal and thermocyclic exposure]. *Tsentral'noukrains'kyj*

naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky - Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences, 3(34), 72-81 [in Ukrainian].

Anatoly Rutkovskiy, PhD tech. sci, Senior Researcher

National Academy of sciences of Ukraine G.S. Pisarenko institute for problems of strength, Ukraine

Sergiy Markovych, Assos. Prof., PhD tech. sci, **Sergiy Mahopets**, Assos. Prof., PhD tech. sci,

Viktor Markovych, Holder of the third (educational and scientific)

Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine

Wear resistance of titanium alloy VT1-0 with a modified surface under abrasive action

The cost of rebuilding machine parts as a result of wear is enormous and rising every year. At a US symposium on reducing wear in machinery, the general consensus was that wear management is central to solving national problems such as energy conservation, material reduction, and ensuring the reliability and safety of mechanical systems. Nitriding significantly increases the wear resistance of metals and alloys. The formation of chemical compounds in titanium alloys by introducing nitrogen or increasing its concentration limit changes the rate of chemical reactions and the kinetics of oxide film growth, and increases their adhesion to the substrate. This leads to a decrease in the intensity of adhesive node formation and improves the tribological characteristics of titanium alloys. Therefore, it is necessary to study a titanium alloy with a hardened nitrided layer to obtain experimental results to determine the regularity of the influence of diffusion saturation parameters on wear resistance under abrasive conditions.

The universal installation "VIPA-1" was used for vacuum ion nitriding in the pulse mode and the formation of diffusion layers on the surface. Technological parameters of vacuum ion nitriding in the pulse mode: temperature - 550°C, pressure - 25-150 Pa, processing time - 10 hours, ratio of reaction gases - 80% Ag + 20% N₂. For experimental studies, samples of VT1-0 titanium alloy with dimensions of 30x30 mm and a thickness of 5 mm were used. The surface hardening of the samples was carried out uniformly around the entire perimeter, which ensures a uniform thickness of the diffusion layer.

The analysis of the operating conditions of the friction surfaces of most structural elements made it possible to use the installation for bench tests according to the scheme of wear with a free abrasive (Brinell method). Wear tests were carried out on an experimental setup in accordance with GOST 23.208-79 (Fig. 2). The friction process was modelled in the presence of a free, not rigidly fixed abrasive, which coincides with the American standard ASTM C 6568.

The experiment was carried out at a sliding speed of 0.158 m/s, a load of 20 kg (with a shoulder of 272 mm) and a friction path of 50 m. Steel 45, hardened to a hardness of 480-500 HB, was used as a reference. The wear body was a disc made of VT1-0 titanium alloy with a diameter of 100 mm and a thickness of 3.5 mm.

On the basis of experimental studies, it has been established that the main mechanisms for increasing the wear resistance of titanium alloys as a result of the process of diffusion saturation of the surface with nitrogen during vacuum ion nitriding in the pulse mode are strengthening of the surface layers; creation of a favourable residual stress pattern; change in the patterns of deformation of the surface layers; change in the chemical and adhesive properties of the surface; transfer of diffusing nitrogen atoms into the depth of the matrix during friction due to the tribodiffusion effect.

Conclusions. 1. Maximum wear rate of titanium alloy VT1-0 without hardening.

2. The effect of thermocyclic nitriding increases the wear resistance of VT1-0 alloy: in sand - 3 times; in water + sand - 3.5 times; in salt + sand - 2.5 times.

3. The effect of isothermal nitriding increases the wear resistance of VT1-0 alloy: in sand - 4 times; in water + sand - 3.5 times; in salt + sand - 2.5 times.

ion nitriding, pulse mode, titanium alloy, wear resistance, free abrasive

Одержано (Received) 06.11.2023

Прорецензовано (Reviewed) 11.12.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023