

УДК 669.295:621.793:620.178.162.4 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.148-153](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.148-153)

М. М. Студент¹, проф., д-р техн. наук, О. Г. Лук'яненко¹, ст. дослідник, канд. техн. наук, І. М. Погрелюк¹, проф., д-р техн. наук, С. І. Маркович², доц., канд. техн. наук, В. С. Труш¹, ст. дослідник, д-р техн. наук

¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів, Україна

²Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: student.phmi@gmail.com, alukanenko246@gmail.com, irynapohrelyuk@gmail.com, marko60@ukr.net, trushvasyl@gmail.com

Антифрикційні властивості титанового сплаву ВТ6, зміцненого дифузійним насиченням елементами втілення

В роботі вивчали вплив модифікування поверхні титанового сплаву ВТ6 елементами втілення (азот, кисень) для підвищення його трибологічних характеристик в парі із контртілом із сталі Х18Н10Т в умовах тертя ковзанням без мащення за питомого навантаження 1,0 МПа упродовж 600 с. Хіміко-термічною обробкою на титанових зразках було сформовано дифузійні поверхнево зміцнені шари. Визначено їх фазовий склад, який після азотування відповідав нітриду титану, оксидування – оксиду титану, а після оксинітрування – оксинітриду титану. Коефіцієнт тертя у парі азотований сплав ВТ6 – сталь Х18Н10Т зростає у часі випробувань та досягав високого значення ($f = 0,6$). Гострі виступи на азотованій поверхні зрізали шари нержавної сталі. Коефіцієнт тертя у парі оксидований та оксинітрований ВТ6 – сталь Х18Н10Т знижувався у часі та досягав низьких значень ($f = 0,15...0,20$), що відбувалось внаслідок притирання поверхонь цих елементів тертя.

титановий сплав ВТ6, хіміко-термічна обробка, фазовий склад, коефіцієнт тертя

Постановка проблеми. Титанові сплави широко використовуються в аерокосмічній, оборонній та суднобудівній промисловості завдяки їх низькій питомій вазі, високій питомій міцності та корозійній стійкості [1-3]. Останнім часом загострилася потреба у підвищенні зносостійкості та трибологічних характеристик за одночасного зменшення ваги важких безпілотних літальних апаратів (дронів), як військового, так і цивільного призначення. Актуальною залишається заміна лопаток із нікелевих сплавів газотурбінних двигунів літаків та вертольотів, сталевих хромованих штоків гідроциліндрів, шестерень, зубчастих коліс дронів на титанові. Зокрема, заміна сталевих гідроциліндрів на титанові дасть можливість зменшити вагу важких безпілотних літальних апаратів на десятки кілограм. Це дозволить підвищити їх вантажопідйомність, а, отже, збільшити кількість гербіцидів під час обприскування полів, якщо це сільськогосподарські дрони, або збільшити кількість вибухівки на військових дронах. Елементи кріплення з титанових сплавів не менш міцні, ніж сталеві і відіграють важливу роль у зниженні ваги літальних апаратів. Разом з тим, титанові сплави мають низьку зносостійкість та схоплюються під час тертя з елементами кріплення. Тому елементи кріплення із титанових сплавів можна застосовувати лише із зносостійкими покриттями [4-7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для підвищення трибологічних характеристик титанових сплавів найбільш вдалим є дифузійні покриття, отримані хіміко-термічною обробкою титанових сплавів, завдяки якій відбувається твердорозчинне

зміцнення поверхневих шарів елементами втілення (кисень, азот) та формування оксидних або нітридних шарів на поверхні [6, 7]. Така хіміко-термічна обробка не змінює товщини деталей та їх шорсткість. Сам процес хіміко-термічної обробки суміщається із термічною обробкою на максимальну міцність та ударну в'язкість і відбувається у регламентованому газовому середовищі за температури не вищої за 850°C продовж 2...5 годин. Перевагою такого способу оброблення є можливість одночасно проводити хіміко-термічну обробку сотень деталей. В процесі хіміко-термічної обробки деталей із титанових сплавів авіаційної техніки формується градієнтно-зміцнений приповерхневий шар товщиною до 200 мкм з підвищеними трибологічними та фізико-механічними характеристиками. Завдяки запропонованій градієнтній структурі зміцненого шару (фазова плівка та твердий розчин втілення) з регламентованими характеристиками (товщина фазової плівки, твердість поверхні та глибина зміцненого шару) буде забезпечено як високу зносостійкість, так і хороші втомні властивості [6, 7].

Постановка завдання. Мета роботи – підвищення трибологічних характеристик титанового сплаву ВТ6 формуванням на його поверхні шарів, дифузійно модифікованих елементами втілення. Для цього необхідно:

- хіміко-термічною обробкою сформуванати фазово-структурний стан (фазова плівка та твердий розчин втілення) приповерхневого шару на зразках титанового сплаву ВТ6 різними домішками втілення (O_2 , N_2);
- визначити отримані характеристики поверхневого шару (шорсткість, мікротвердість, фазовий склад поверхні) після різних ХТО;
- виконати порівняльні трибологічні дослідження роботоздатності отриманих поверхневих структур за сухого зворотно-поступального тертя у парі з контртілом зі сталі Х18Н9Т.

Матеріали та методики досліджень. Досліджували зразки з титанового сплаву ВТ6 системи легування Ti-6Al-4V-3 фазовим складом ($\alpha+\beta$), хімічний склад якого наведено в табл. 1.

Таблица 1 – Хімічний склад титанового сплаву ВТ6 (ГОСТ 19807-74)

Марка Сплаву	Легувальні елементи, мас.%							
	V	Al	C	Fe	Si	O	N	H
ВТ6	4,30	6,20	0,10	0,30	0,15	0,20	0,05	0,015

Для формування зміцнених шарів зразки піддавали хіміко-термічній обробці (ХТО) у вакуумній печі за наступними режимами:

1) Режим оксидування. Зразки нагрівали в електричній печі у вакуумі ($P = 0,6$ mPa) до 750°C, витримували 5 год у вакуумі 0,1 Pa, охолоджували до 350°C і напускали атмосферне повітря, після чого охолоджували піч із зразками до кімнатної температури.

2) Режим азотування. Зразки нагрівали у вакуумі ($P = 0,6$ mPa) до 850°C, напускали технічний азот до тиску $P = 10^5$ Pa, витримували 3 год, охолоджували в азоті до 250°C, вакуумуванням видаляли азот та охолоджували піч із зразками до кімнатної температури.

3) Режим оксинітрування. Зразки в електричній печі нагрівали у вакуумі ($P = 0,6$ mPa) до 650°C, напускали азот-кисневу суміш (80% N_2 + 20% O_2) до тиску $P = 0,01$ Pa, нагрівали до 850°C та витримували 3 год, вакуумували та витримували 0,5 год та охолоджували піч із зразками до кімнатної температури.

Мікротвердість в перерізах приповерхневих шарів визначали на приладі ПМТ-3М за навантаження на індентор 0,49 N. Трибологічні характеристики трибопари «циліндр – пластина» визначали на трибометрі в умовах зворотно-поступального руху циліндра Ø10 mm з нержавної сталі Х18Н10Т з полірованою поверхнею контакту (рис. 1). Зразки у вигляді пластини 15×25×1 mm із титанового сплаву ВТ6 оксидували, азотували та оксинітрували. Фрикційну поведінку титанового сплаву ВТ6 зі зміцненою поверхнею визначали за умов тертя без мащення за питомого навантаження 1 МПа в умовах зворотно-поступального переміщення на 10 mm циліндра по пластині.

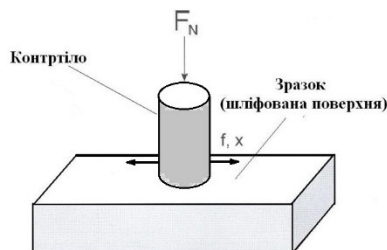


Рисунок 1 – Схема дослідження фрикційних властивостей поверхнево зміцнених шарів на сплаві ВТ6 за тертя ковзанням

Джерело: розроблено авторами

Фазовий склад поверхневих шарів металу визначали на рентгенівському дифрактометрі DRON-3.0 у монохроматичному $\text{CuK}\alpha$ - випромінюванні з фокусуванням трубки за схемою Бреґґа–Брентано. Напруга на аноді рентгенівської трубки 30 кВ за струму 20 мА. Сканували з кроком $0,05^\circ$. Використовували програмне забезпечення Sietronix, PowderCell 2.4 і FullProf, за допомогою яких виконували Фур'є-обробку дифрактограм, визначали місця дифракційних максимумів відбиття і періоди ґраток, ідентифікованих за даними для фаз з картотеки JCPDS - ASTM.

Стан поверхні до та після дифузійного насичення й фрикційного зносу досліджували за допомогою сканувального електронного мікроскопа EVO-40XVP, а хімічний склад поверхневого шару металу визначали з використанням системи мікроаналізу INCA Energy 350.

Виклад основного матеріалу. В процесі хіміко-термічної обробки на плоских титанових зразках було сформовано дифузійні покриття. Фазовий склад покриття після азотування за стехіометричним складом відповідав $\sim\text{TiN}_{1,83}$, після оксидування – оксиду титану ($\sim\text{TiO}_2$), а після оксинітрування – оксинітриду титану, який за складом був близьким до еквіатомного ($\sim\text{TiN}_{0,46}\text{O}_{0,54}$) (рис. 2).

Спектральним аналізом поверхневого шару сплаву ВТ6 після азотування у ньому окрім азоту (9,55 мас.%) виявлено значний вміст кисню (4,32 мас.%) табл. 2. Однак така кількість кисню не приводить до формування оксинітридного шару. Фазовий аналіз вказує на формування на поверхні модифікованого шару лише нітриду титану рис. 2. Очевидно, це зумовлено тим, що азотування проводили в атмосфері технічно чистого азоту, який містив певну кількість кисню. На поверхні оксидованого шару виявлено 14,31 мас. % кисню, що підтверджує формування шару із оксиду титану. На поверхні оксинітрованого шару виявлено значну кількість як кисню так і азоту, що підтверджує формування на поверхні сплаву ВТ6 шару з оксинітриду титану табл. 2.

Шорсткість поверхні зразків та їх мікротвердість після хіміко-термічної обробки наведено у таблиці 3. Мікротвердість та шорсткість поверхні плоских зразків з титанового сплаву ВТ6 до ХТО становили $(194,6 \pm 3,3) \text{HV}_{0,49}$ та $R_a = 0,067 \pm 0,005 \mu\text{m}$ відповідно. Азотування титанового сплаву підвищило мікротвердість його поверхні до $(983 \pm 82) \text{HV}_{0,49}$. Мікротвердість оксидованого шару виявилась нижчою – (755 ± 40)

$HV_{0,49}$, а оксинітридний шар відзначився найменшою мікротвердістю – $(557\pm32) HV_{0,49}$, хоча у 2,8 рази перевищує мікротвердість сплаву ВТ6 без хіміко-термічної обробки.

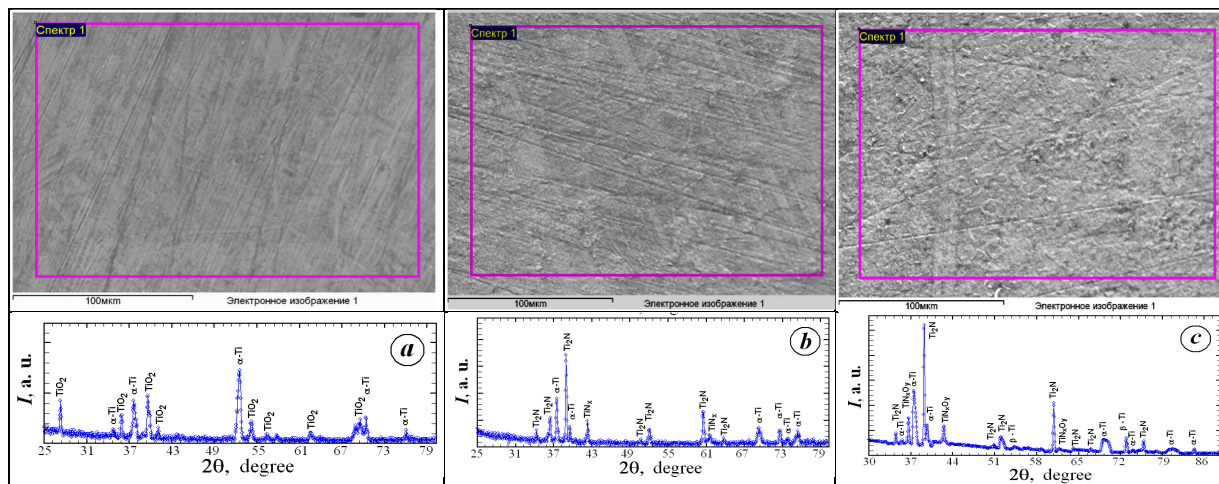


Рисунок 2 – Морфологія поверхні зразків сплаву ВТ6 з дифузійно модифікованими шаром та її фазовий склад: *a* – TiN; *b* – TiO; *c* – TiNO

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 2 – Елементний склад поверхневих шарів зразків титанового сплаву ВТ6 після різних типів ХТО

Елемент	Азотування (TiN)		Оксидування (TiO)		Оксинітрування (TiNO)	
	Wt. %	At. %	Wt. %	At. %	Wt. %	At. %
N	9,55	20,49	0,00	0,00	6,73	17,00
O	4,32	9,43	14,31	30,51	7,62	16,39
Al	4,55	5,95	4,52	5,71	4,72	6,05
V	3,88	2,67	3,05	2,07	3,11	2,12
Ni	0,14	0,1	0,11	0,07	0,17	0,11
Fe	0,17	0,10	0,31	0,19	0,25	0,15
Ti	залишок		залишок		залишок	

Джерело: розроблено авторами

Шорсткість поверхні сплаву ВТ6 після хіміко-термічної обробки практично не залежала від технології поверхневого оброблення табл. 3.

Таблиця 3 – Показники шорсткості та мікротвердості поверхні титанового сплаву ВТ6 після ХТО

Тип ХТО	Після ХТО	
	$R_a, \mu m$	$HV_{0,49}, \text{кг/мм}^2$
Азотування	$0,264\pm0,007$	983 ± 82
Оксидування	$0,257\pm0,007$	755 ± 40
Оксинітрування	$0,264\pm0,009$	557 ± 32

Джерело: розроблено авторами

В процесі тертя пари необробленого сплаву ВТ6 – сталь Х18Н9Т відбувалося мікроприварювання виступів поверхні та схоплення поверхонь. Трибологічні дослідження показали, що після азотування коефіцієнт тертя (f) сплаву ВТ6 в парі зі сталлю Х18Н9Т в умовах осциляційного тертя без мащення суттєво підвищився до

значення 0,6 (рис. 3 а). При цьому зношувався сталевий стрижень внаслідок різання гострими виступами азотованої поверхні.

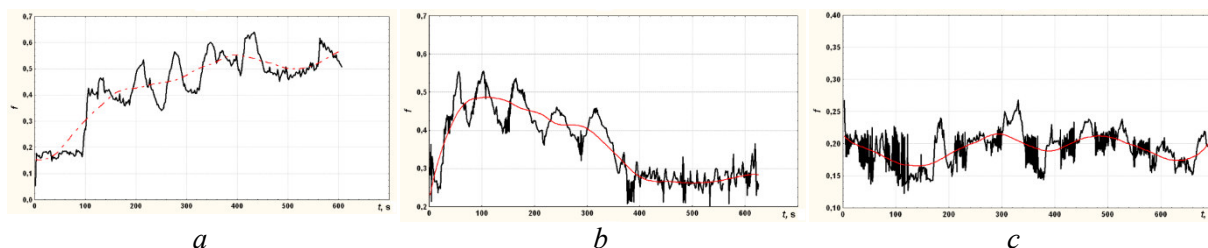


Рисунок 3 – Зміна коефіцієнта тертя (f) в часі t за сухого тертя ковзанням зразків зі сплаву ВТ6, поверхнево зміцнених азотуванням (а), оксидуванням (b) та оксинітруванням (c), що контактували зі стрижнем зі сталі Х18Н10Т за питомого навантаження 1,0 МПа

Джерело: розроблено авторами

Коефіцієнт тертя у парі сплав ВТ6 – сталь Х18Н9Т після оксидування та оксинітрування виявився суттєво меншим. Причому для пари оксидований ВТ6 – сталь Х18Н9Т він зменшувався у часі та досягав значень $f = 0,25 \dots 0,35$ (рис. 3 b), а у парі оксинітрований ВТ6 залишався стабільним впродовж випробовувань $f = 0,15 \dots 0,20$ (рис. 3 c). На відміну від азотованої поверхні сплаву ВТ6, оксидована та оксинітрована поверхня мали значно меншу мікротвердість (табл. 3) і при терті не різали своїми виступами поверхню контртіла, а під час трибологічних випробовувань відбувалося лише притирання поверхонь пари тертя (рис. 3 b, c).

Висновки. Застосування хіміко-термічної обробки у контрольованих газових середовищах позитивно вплинуло на трибологічну поведінку зразків сплаву ВТ6 у парі з нержавною сталлю Х18Н10Т, зокрема, перестало відбуватися схоплення контактуючих поверхонь під час сухого тертя ковзанням.

1. Хіміко-термічною обробкою на титанових зразках було сформовано дифузійні поверхнево зміцнені шари. Визначено їх фазовий склад, який після азотування відповідав $\sim \text{TiN}_{1,83}$, оксидування – оксиду титану типу $\sim \text{TiO}_2$, а після оксинітрування – оксинітриду титану типу $\sim \text{TiN}_{0,46}\text{O}_{0,54}$.

2. Коефіцієнт тертя у парі азотований сплав ВТ6 – сталь Х18Н10Т зростав у часі випробувань та досягав високого значення ($f = 0,6$). Гострі виступи на азотованій поверхні зрізали шари нержавної сталі.

3. Коефіцієнт тертя у парі оксидований та оксинітрований ВТ6 – сталь Х18Н10Т знижувався у часі та досягав нижчих значень: ($f = 0,25 \dots 0,35$) для оксидованої поверхні та ($f = 0,15 \dots 0,20$) – для оксинірованої, що відбувалось внаслідок притирання поверхонь цих пар тертя.

Таким чином, підтверджена доцільність застосовування ХТО у контрольованих газових середовищах для виробів з титанових сплавів для їх роботи у парах тертя. Зокрема, для досягнення оптимальних співвідношень шорсткості та твердості контактуючих поверхонь для тривалої роботи цих трибопар, потрібні додаткові дослідження з оптимізації режимів ХТО титанових сплавів для отримання заданих характеристик поверхневих шарів металу.

Робота виконана за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України в межах проєкту 2025.06/0028 «Розроблення технології поверхневого зміцнення деталей з титанових сплавів двигунів авіаційної техніки регламентованим дифузійним насиченням елементами втілення».

Список літератури

1. Budinski K. G. Tribological properties of titanium alloys. *Wear*. 1991. Vol. 151, Iss. 2. P. 203–217.
2. Bansal D. G., Eryilmaz O. L., Blau P. J. Surface engineering to improve the durability and lubricity of Ti-6Al-4V alloy. *Wear*. 2011. Vol. 271. P. 2006–2015.
3. Bell T., Dong H., Sun Y. Realizing the potential of duplex surface engineering. *Tribology International*. 1998. Vol. 31, № 1–3. P. 127–137.

4. Bansal D. G., Kirkham M., Blau P. J. Effects of combined diffusion treatments and cold working on the sliding friction and wear behavior of Ti-6Al-4V. *Wear*. 2013. Vol. 302. P. 837–844.
5. Diffusive thermal treatments combined with PVD coatings for tribological protection of titanium alloys / E. Marin, R. Offoiaich, M. Regis, S. Fusi, A. Lanzutti, L. Fedrizzi. *Materials and Design*. 2016. Vol. 89. P. 314–322.
6. Погрелюк І. М., Федірко В. М., Довгунік В. М. Вплив азотування та оксидування на триботехнічні властивості титанових сплавів. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. 2000. № 3. С. 123–126.
7. Łępicka M., Grądzka-Dahlke M. Surface modification of Ti6Al4V titanium alloy for biomedical applications and its effect on tribological performance — a review. *Rev. Adv. Mater. Sci.* 2016. Vol. 46. P. 86–103.

References

1. Budinski, K. G. (1991). Tribological properties of titanium alloys. *Wear*, 151(2), 203–217.
2. Bansal, D. G., Eryilmaz, O. L., & Blau, P. J. (2011). Surface engineering to improve the durability and lubricity of Ti-6Al-4V alloy. *Wear*, 271, 2006–2015.
3. Bell, T., Dong, H., & Sun, Y. (1998). Realizing the potential of duplex surface engineering. *Tribology International*, 31(1–3), 127–137.
4. Bansal, D. G., Kirkham, M., & Blau, P. J. (2013). Effects of combined diffusion treatments and cold working on the sliding friction and wear behavior of Ti-6Al-4V. *Wear*, 302, 837–844.
5. Marin, E., Offoiaich, R., Regis, M., Fusi, S., Lanzutti, A., & Fedrizzi, L. (2016). Diffusive thermal treatments combined with PVD coatings for tribological protection of titanium alloys. *Materials and Design*, 89, 314–322.
6. Pohreliuk, I. M., Fedirko, V. M., & Dovhunik, V. M. (2000). Influence of nitriding and oxidation on tribological properties of titanium alloys. *Fiz.-khim. mekhanika materialiv*, 3, 123–126 [in Ukrainian].
7. Łępicka, M., & Grądzka-Dahlke, M. (2016). Surface modification of Ti6Al4V titanium alloy for biomedical applications and its effect on tribological performance — a review. *Rev. Adv. Mater. Sci.*, 46, 86–103.

Mykhailo Student¹, Prof., DSc., **Oleksandr Lukyanenko**¹, Sr. Researcher, PhD, **Iryna Pohreliuk**¹, Prof., DSc., **Vasil Trush**¹, Sr. Researcher, DSc., **Markovych Sergiy**², Assoc. Prof., PhD

¹Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine

²Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine

Antifriction Properties of VT6 Titanium Alloy Strengthened by Diffusion Saturation with Interstitial Elements

Titanium alloys are widely used in the aerospace, defensive and shipbuilding industry due to their low weight, high specific strength and corrosion resistance. Recently, the need for increased durability and tribological characteristics of simultaneous weight loss of heavy unmanned aerial vehicles (drones), both military and civilian purposes. Replacing steel parts with titanium will reduce the weight of heavy unmanned aircraft by tens of kilograms. However, titanium alloys have low durability and are grasped during friction with mounting elements. Therefore, the elements of attachment from titanium alloys can only be used with durable coatings. Which determined the purpose of the work - to increase the tribological characteristics of the titanium alloy of VT6 by the formation of layers on its surface, diffusely modified by interstitial elements.

For the formation of strengthened layers, samples were subjected to thermochemical treatment (TCT) in the vacuum oven according to the following modes: 1) Oxidation mode. The samples were heated in an electric furnace in a vacuum ($P = 0.6$ mPa) to 750 °C, kept 5 h in a vacuum 0.1 Pa, cooled to 350 °C and put atmospheric air, and then cooled the stove with samples to room temperature. 2) Nitriding mode. The samples were heated in vacuum ($P = 0.6$ mp) to 850 °C, technical nitrogen to $P = 10^5$ Pa, kept 3 h, cooled in nitrogen to 250 °C, vacuum removed nitrogen and cooled the oven with samples to room temperature. 3) Oxynitriding mode. The samples in the electric furnace were heated in vacuum ($P = 0.6$ mPa) to 650 °C, the nitrogen oxygen mixture (80% N_2 + 20% O_2) was allowed to pressure $P = 0.01$ Pa, heated to 850° C and kept 3 h, after cooling in vacuum to room temperature. Microhardness from surface and in the sections of the surface layers was determined on the PMT-3M device for the load on the indenter 0.49 N. The work studied the effect of modification of the Titanium alloy surface with the interstitial elements (nitrogen, oxygen) to increase its tribological characteristics paired with a countertil of X18H10T in conditions of dry friction with sliding with a specific load of 1.0 MPa for 600 s. By the thermochemical treatment of titanium samples was formed diffusion surface-strengthened layers. Their phase composition was determined, which after nitriding corresponded to $TiN_{1.83}$, after oxidation – titanium oxide TiO_2 , and after oxynitriding – titanium oxyinitride type $TiN_{0.46}O_{0.54}$. The friction coefficient in the pair of nitrided VT6 alloy – steel X18H10T increases during the test time and reached a high value ($f = 0.6$). Acute projections on the nitrided surface was cuted the layers of stainless steel. The friction coefficient in the pair of oxidized and oxinitrided VT6 alloy – steel X18H10T10T decreased over time and reached low values ($f = 0.15-0.20$), which was due to the grind in of the surfaces of these elements of friction.

VT6 titanium alloy, thermochemical treatment, phase composition, friction coefficient

Одержано (Received) 12.09.2025

Прорецензовано (Reviewed) 18.09.2025

Прийнято до друку (Approved) 23.09.2025