

УДК 669.295:621.793:620.178.162.4

ВПЛИВ ДИФУЗІЙНОГО НАСИЧЕННЯ ЕЛЕМЕНТАМИ ВТІЛЕННЯ НА АНТИФРИКЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХНІ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ ВТ6

М.М. Студент, проф., док. техн. наук,

О.Г. Лук'яненко, старший досл., канд.

І.М. Погрелюк, проф., док. техн. наук,

В.С. Труш, стар. дослідн., док. техн. наук,

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

С.І. Маркович, доц., канд. техн. наук,

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький

Постановка проблеми. Титанові сплави широко використовуються в аерокосмічній, оборонній та суднобудівній промисловості завдяки їх низькій питомій вазі, високій питомій міцності та корозійній стійкості. Актуальною залишається заміна лопаток із нікелевих сплавів газотурбінних двигунів літаків та вертольотів, сталевих хромованих штоків гідроциліндрів, шестерень, зубчастих коліс дронів на титанові [1-3]. Загострилася потреба у зменшенні ваги важких безпілотних літальних апаратів (дронів), як військового так і цивільного призначення. Зокрема, заміна сталевих гідроциліндрів на титанові дасть можливість зменшити вагу важких безпілотних літальних апаратів, що дозволить підвищити їх вантажопідйомність. 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 (ХТО) 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 сформувати 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 ($\alpha+\beta$) з хімічним складом згідно ГОСТ 19807-74.

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 $750^{\circ}C$, витримували 5 год у вакуумі 0,1 Pa, охолоджували до $350^{\circ}C$ 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 $850^{\circ}C$, напускали технічний азот до тиску $P = 10^5$ Pa, витримували 3 год, охолоджували в азоті до $250^{\circ}C$, 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 $650^{\circ}C$, напускали азот-кисневу суміш (80% N_2 + 20% O_2) до тиску $P = 0,01$ Pa, нагрівали до $850^{\circ}C$ 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 $\varnothing 10$ mm з нержавної сталі Х18Н10Т з полірованою поверхнею контакту. Фазовий склад поверхневих шарів металу визначали на рентгенівському дифрактометрі DRON-3.0 у монохроматичному $Cu_{K\alpha}$ - випромінюванні з фокусуванням трубки за схемою Бреґга–Брентано. Напруга на аноді рентгенівської трубки 30 кВ за струму 20 мА. Сканували з кроком $0,05^{\circ}$. Використовували програмне забезпечення Sietronix, Powder Cell 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 $\sim TiN_{1,83}$, після оксидування – оксиду титану ($\sim TiO_2$), а після оксинітрування–оксинітриду титану, який за складом був близьким до еквіатомного ($\sim TiN_{0,46}O_{0,54}$) (рис. 1).

Спектральним аналізом поверхневого шару сплаву ВТ6 після азотування у ньому окрім азоту (9,55 мас.%) виявлено значний вміст кисню (4,32 мас.%) табл. 1. Однак така кількість кисню не приводить до формування оксинітридного шару. Фазовий аналіз вказує на формування на поверхні модифікованого шару лише нітриду титану рис. 1. 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. 1.

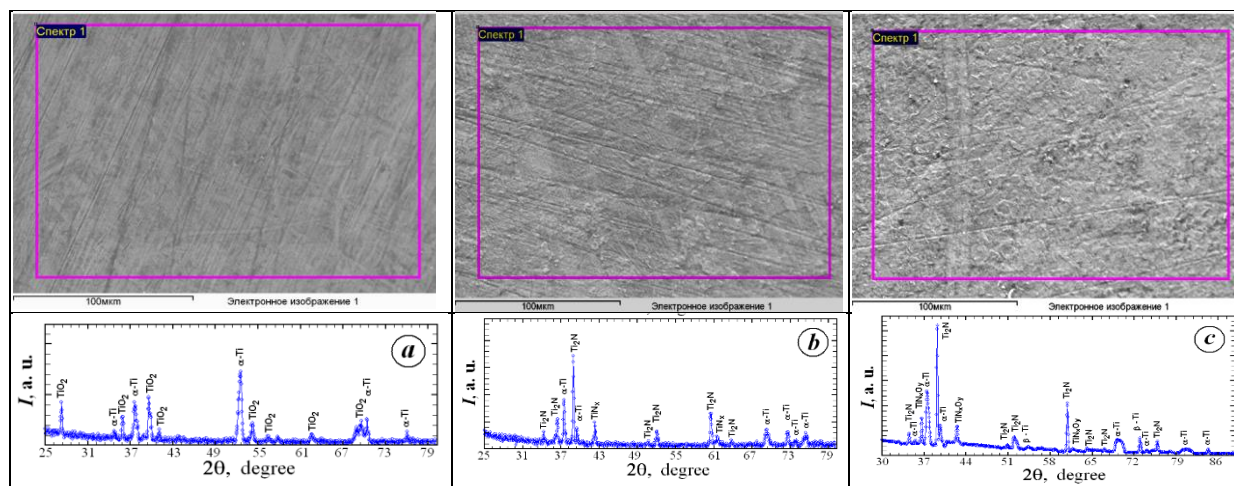


Рисунок 1 – Морфологія поверхні зразків сплаву ВТ6 з дифузійно модифікованими шаром та її фазовий склад: *a* – TiN; *b* – TiO; *c* – TiNO

Таблиця 1 – Елементний склад поверхневих шарів зразків титанового сплаву ВТ6 після різних типів ХТО

Елемент	Азотування (TiN)		Оксидування (TiO)		Оксидитрування (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	

Шорсткість поверхні зразків та їх мікротвердість після хіміко-термічної обробки наведено у таблиці 2. 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 – $(755 \pm 40) \text{ HV}_{0,49}$, а оксинітридний шар відзначився найменшою мікротвердістю – $(557 \pm 32) \text{ HV}_{0,49}$, хоча у 2,8 рази перевищує мікротвердість сплаву ВТ6 без хіміко-термічної обробки.

Шорсткість поверхні сплаву ВТ6 після хіміко-термічної обробки практично не залежала від технології поверхневого оброблення табл. 2.

Таблиця 2 Шорсткість та мікротвердість поверхні титанового сплаву ВТ6 після ХТО

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

В процесі тертя пари необробленого сплаву ВТ6 – сталь Х18Н9Т відбувалося мікроприварювання виступів поверхні та захоплення 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. 2, *a*). При цьому зношувався сталевий стрижень внаслідок різання гострими виступами азотованої поверхні.

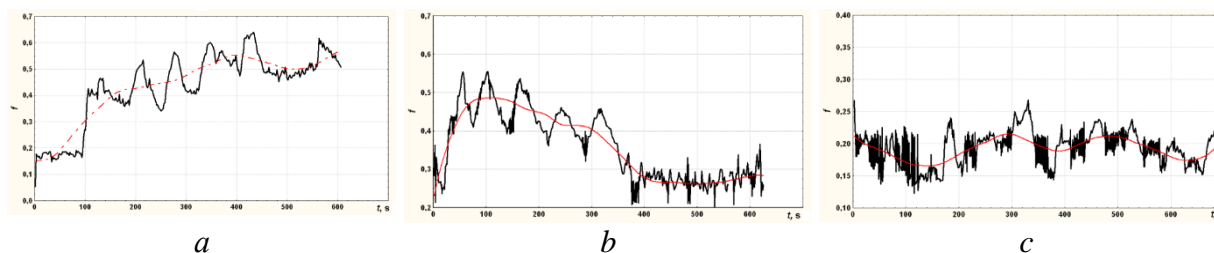


Рисунок 2 – Зміна коефіцієнта тертя (f) в часі t за сухого тертя ковзанням зразків зі сплаву ВТ6, поверхнево зміцнених азотуванням (а), оксидуванням (b) та оксинітруванням (с), що контактували зі стрижнем зі сталі Х18Н10Т за питомого навантаження 1,0 МПа

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. 2, b), а у парі оксинітрований ВТ6 залишався стабільним впродовж випробовувань $f = 0,15 \dots 0,20$ (рис. 2, c). На відміну від азотованої поверхні сплаву ВТ6, оксидована та оксинітрована поверхня мали значно меншу мікротвердість (табл. 2) і при терті не різали своїми виступами поверхню контртіла, а під час трибологічних випробовувань відбувалося лише притирання поверхонь пари тертя (рис. 2, 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 оксинітрованої, що відбувалось внаслідок притирання поверхонь цих пар тертя. 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

- Budinski, K.G. (1991) Tribological properties of titanium alloys. *Wear*, 2 (151), 203-217.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.11.021>
- Bell, T., Dong, H., & Sun, Y. (1998) Realizing the potential of duplex surface engineering. *Tribology International*, 1-3 (31), 127-137. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(98\)00015-2](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(98)00015-2)
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.034>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.011>
- Pohrelyuk, I.M., Fedirko, V.M. & Dovhunyk, V.M. (2000) Influence of nitriding and oxidation on the wear of titanium alloys. *Materials Science*, 3 (36), 466-471. [in Ukrainian] <http://dx.doi.org/10.1007/BF02769614>
- Łepicka, 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. <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0153-8>