Похмурський В.І.,*
Винар В.А.,*
Василів Х.Б.,*
Закієв В.І.,**
Рацька Н.Б.*
*Фізико-механічний інститут
ім. Г. В. Карпенка НАН України,
м. Львів, Україна,
**Національний авіаційний університет,
м. Київ, Україна
E-mail: vynar@ipm.lviv.ua

ОСОБЛИВОСТІ МІКРОДЕФОРМАЦІЇ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ТА МЕХАНІЗМИ ЗНОШУВАННЯ α-ТИТАНУ ЗА ВОДНЕВОГО ВПЛИВУ

УДК. 620.178.162.42

Досліджено особливості мікродеформації поверхневих шарів та механізми зношування титану ВТ1-0 після електролітичного наводнювання. Встановлено, що після катодної поляризації протягом 1 год за густини струму 1 А/дм^2 концентрація водню у поверхневих шарах титану відповідає граничній, а за 2 А/дм^2 перевищує її у 1,5 рази завдяки утворенню гідридних фаз (TiH_2). Після наводнювання внутрішні напруження у кристалічній гратці титану зростають на 19 %, що призводить до підвищення мікротвердості на 20 % та модуля пружності на 15 %. Водночас суттєво (на 40 %) знижується робота відновлення об'єму матеріалом після пружної деформації та на 6 % - пластичної. Зниження роботи пружно-пластичної деформації призводить до зменшення сили тертя у 2 ... 3 рази порівняно з вихідним станом. Зношування відбувається внаслідок утворення тріщин і крихкого руйнування поверхневих шарів. Після стирання наводненого шару переважає пластична деформація мікровиступів.

Ключові слова: мікродеформація поверхневих шарів, механізми зношування, електролітичне наводнювання.

Вступ

Трибологічна поведінка металів значною мірою залежить від стану і властивостей тонкого приповерхневого шару товщиною ~ 0,1 мм, у якому локалізуються контактні процеси. Під час ковзання мікровиступів у точках контакту виникають напруження вздовж різних напрямків, які змінюються від стиску до розтягу і викликають пошкодження поверхні [1]. Опір руйнуванню та характер пошкоджень визначається насамперед мікромеханічними характеристиками поверхневих шарів, роботою пружного та пластичного деформування мікровиступів. Ці величини можуть суттєво відрізнятися від механічних характеристик макрооб'ємів металу як внаслідок масштабного ефекту, так і в результаті адсорбції та оклюзії газів, зокрема, водню.

Значною мірою це стосується металів, що володіють гетерними властивостями, зокрема, титану. Він відноситься до групи екзотермічних металевих оклюдерів, який адсорбує та поглинає водень вже за кімнатної температури з утворенням твердих розчинів та гідридних фаз [2, 3]. При збільшенні вмісту водню в титані суттєво понижується напруга його руйнування, оскільки гідридне перетворення має значний об'ємний ефект і призводить до збільшення дефектності гратки і втрати пластичності [4].

Мета даної роботи – дослідити вплив електролітичного наводнювання на особливості мікродеформації поверхневих шарів та механізми зношування α-титану.

Методика експерименту

Електролітичне наводнювання попередньо відпалених зразків титану ВТ1-0 реалізували шляхом катодної поляризації з використанням свинцевого анода за кімнатної температури в 1 - нормальному розчині H_2SO_4 з 10 мг/л As_2O_3. Тривалість поляризації 1 год, густина струму 1,0 ... 2,0 А/дм^2. Концентрацію водню у металі визначали методом локального мас-спектрального аналізу на установці ЭХО-4М з використанням лазерного мікрозонда – екстрактора.

Для визначення механічних властивостей поверхневих шарів застосовували дюрометрію (твердомір ПМТ-3) та метод динамічного індентування [5, 6]. Він грунтується на автоматичній реєстрації діаграми навантаження $P = f(h)$, де P – навантаження на індентор, h – глибина його впровадження у поверхню досліджуваного матеріалу. Крім того, застосовували скретч-метод, що базується на безперервній реєстрації сили опору руху індентора по поверхні з заданим навантаженням (1 Н) і швидкістю переміщення (0,2 мм/с). Метод поєднували з визначенням сили тертя, об'єму витісненого індентором матеріалу та параметрів шорсткості поверхні, яка формується на дні подряпини [7].

Досліджували трибологічну поведінку наводненого матеріалу за умов реверсивного руху за схемою кулька-площина. Навантаження 200 Н, швидкість ковзання індентора 1,6 мм/с, тривалість випробувань 2000 с.

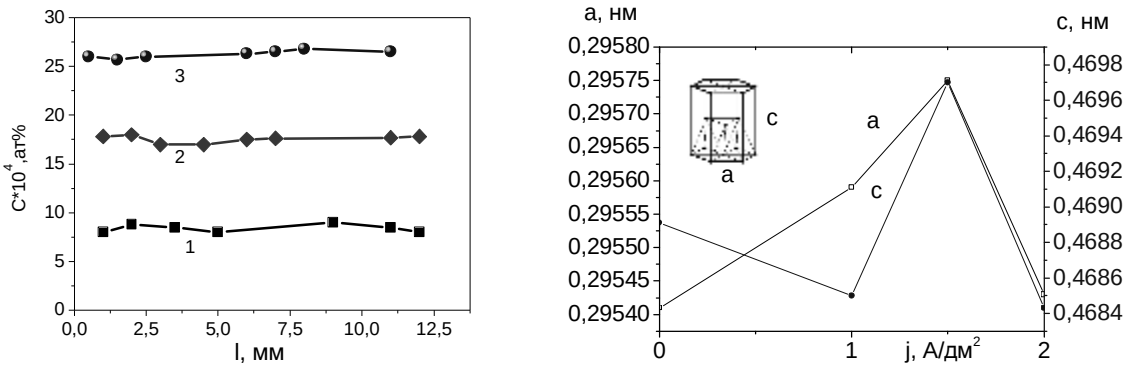
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Мікроструктуру поверхонь оцінювали металографічним методом на сканівному електронному мікроскопі EVO 40XVP. Рентгенофазовий аналіз проводили за масивами рентгенівських дифракційних даних, отриманих на рентгенівському дифрактометрі-дифрактографі ДРОН-2,0М.

Експериментальні результати та їх обговорення

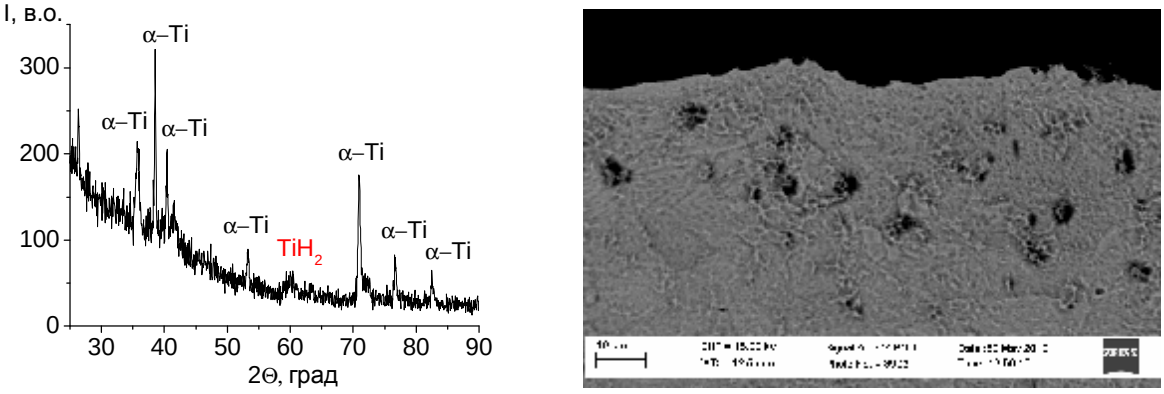
Наводнювання приповерхневих шарів титану ВТ1-0 здійснювали методом катодної поляризації за густини струму 1, 1,5 і 2 А/дм^2 протягом 1 год. Методом локального мас-спектрального аналізу встановлено, що після наводнювання за густини струму 1 А/дм^2 концентрація оклюдованого водню в титані відповідає його граничній розчинності за кімнатної температури і нормального тиску (рис. 1, а). При цьому змінюються міжатомні відстані у кристалічній гратці металу (рис. 1, б).

Після наводнювання за густини струму 2 А/дм^2 концентрація водню в титані підвищується до $26{,}8 \cdot 10^{-4}$ ат.%, що перевищує граничну розчинність у 1,5 рази (рис. 1, а). За цих умов відбувається перебудова кристалічної гратки титану з утворенням гідридних фаз. На рентгенівських дифрактограмах фіксуються рефлекси, що відповідають гідриду TiH_2 (рис. 2, а). Оскільки гідридне перетворення відбувається, як правило, на границях зерен і супроводжується об'ємним ефектом [8], воно ініціює окрихчування матеріалу. Це підтверджує мікроструктура поперечного перерізу металу з дефектами типу пор (рис. 2, б) та значний розкид даних по мікротвердості (рис. 3).



а б

Рис. 1 – Концентрація залишкового водню (а) на поверхні титану у вихідному стані (1) і після наводнювання за густини струму 1 А/дм^2 (2) і 2 А/дм^2 (3); залежність параметрів гратки титану(б) від густини струму наводнювання



а б

Рис. 2 – Дифрактограма кристалічної гратки (а) та виникнення підповерхневих дефектів (б) після наводнювання титану за густини струму 2 А/дм^2

Як видно з рис. 3, традиційний метод вимірювання мікротвердості у випадку наводненого титану виявився недостатньо чутливим та інформативним. У зв'язку з цим для визначення механічних властивостей поверхневих шарів металу застосовували метод динамічного індентування.

Будували діаграми навантаження $P(h)$ для титану у вихідному стані та після катодної поляризації за густини струму 1 А/дм^2 протягом 1 год (рис. 4). Діаграма дає інформацію про роботу, витрачену індентором на подолання опору матеріалу $A_{пласт.}$ (площа під гілкою навантаження) і роботу, витрачену ма-

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

теріалом на відновлення своїх властивостей $A_{пруж.}$ (площа під гілкою розвантаження) (рис. 4). За цими даними визначали ступінь пластичності поверхні ε згідно формули $\varepsilon = \left(A_{пласт.} - A_{пруж.}\right) / A_{пласт.}$. Значення мікротвердості за Меєром знаходили як відношення максимального навантаження $P_{\max}$ до площі проекції відбитка A; модуль Юнга визначали, як $E = S/2\sqrt{\pi / A}$, де S – тангенс кута нахилу початкової ділянки кривої розвантаження.

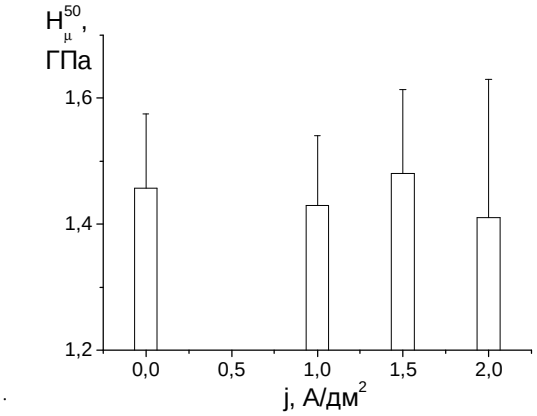


Рис. 3 – Мікротвердість титану після електролітичного наводнювання за різної густини струму

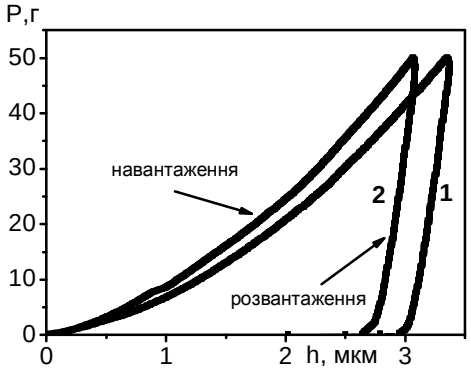


Рис. 4 – Діаграми навантаження титану у вихідному стані (1) та після наводнювання (2)

Виявлено, що в результаті наводнювання механічні властивості поверхневих шарів титану суттєво змінюються (табл. 1). Зокрема, спостерігається зростання внутрішніх напружень у кристалічній гратці на 19 % порівняно з вихідним станом. Це призводить до підвищення мікротвердості (за Меєром) на 20 % і модуля пружності на 15 %. Водночас суттєво (на 40 %) знижується робота відновлення об'єму матеріалом після деформації $A_{пруж}$, що проявляється у підвищенні ступеня пластичності поверхні ε.

Таблиця 1

Мікромеханічні характеристики поверхні титану

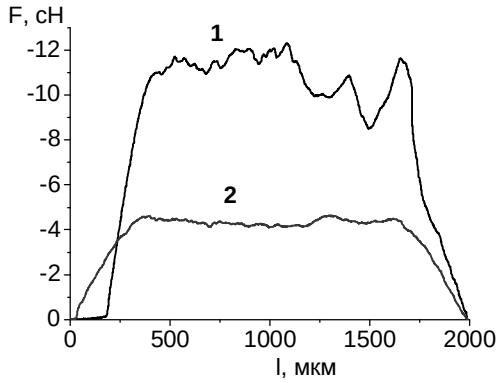
Показники	$h_{\max}$, мкм	h_f, мкм	$H_{Меєр}$, ГПа	E, ГПа	$A_{пласт.}$, Дж	$A_{пруж.}$, Дж	ε	$\sigma_н$, ГПа
Вихідний стан	3,368	2,016	2,066	91,1	62,52	13,54	0,783	0,476
Після наводнювання	3,085	2,642	2,475	105,2	58,88	8,32	0,859	0,567

Примітки: $h_{\max}$ – максимальне заглиблення наконечника; h_f – глибина відбитка; $H_{Меєр}$ – мікротвердість за Меєром; E – модуль Юнга; $A_{пласт.}$ і $A_{пруж.}$ – робота пластичної і пружної деформацій; ε – ступінь пластичності поверхні; $\sigma_н$ – внутрішні напруження.

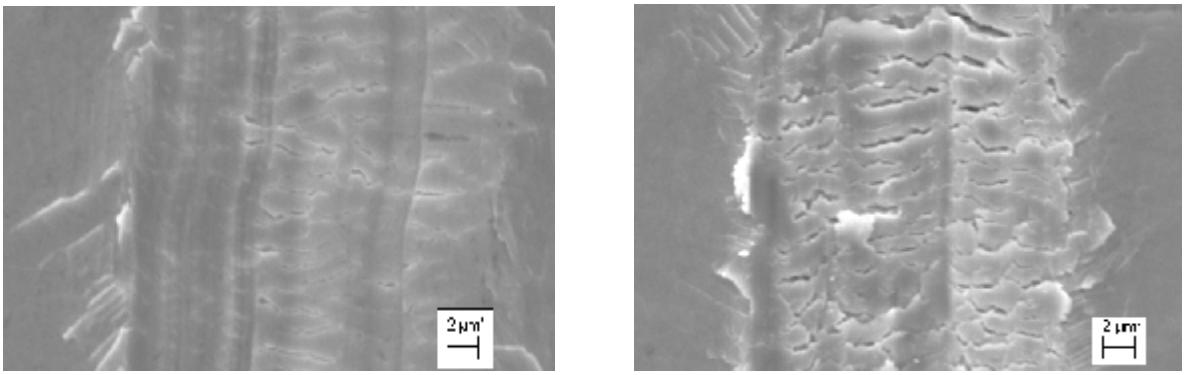
Більше інформації про характеристики поверхневих шарів титану отримано методом скретч-тестування. Характер зміни сили тертя при переміщенні індентора по титану у вихідному стані і після наводнювання суттєво відрізняється (рис. 6, а). У першому випадку на початковому етапі голка індентора ковзає по твердій оксидній плівці і сила тертя близька до нуля. Після руйнування плівки і деформування підповерхневих шарів металу сила тертя різко зростає, і діапазон її коливань досягає ± 30 % (рис. 6, а). Профіль поверхні витісненого індентором матеріалу неоднорідний, містить розриви і нарости внаслідок мікросхоплень з індентором (рис. 6, б). Мікроструктура сліду від індентора містить сітку тріщин, розташованих перпендикулярно до напрямку його руху, які поширюються поза зону контакту на третину її ширини. Концентрація тріщин досягає 10 ... 15 на кожні 10 мкм трека.

Наводнювання титану знижує силу опору руйнуванню утричі, діапазон її коливань зменшується до 4 %. Винесення матеріалу з зони контактування проходить без затрат великої кількості енергії на опір схоплюванню, матеріал "вигорнутий" з зони контактування. Як і у вихідному стані, після наводнювання на всій площі сліду від індентора спостерігаються поперечні тріщини. Їх ширина у наводненого металу значно більша, а площа становить 8 - 12 % всієї площі треку (рис. 6).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



а



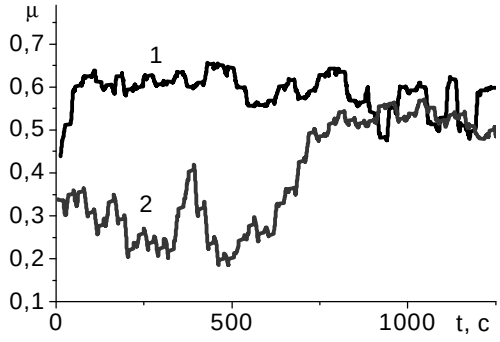
б в

Рис. 6 – Залежність сили тертя від переміщення індентора по титану (а), та топографія сліду від індентора у вихідному стані (б) і після наводнювання за густини струму 1 А/дм^2 протягом 1 год (в)

При переміщенні індентора у кристалічній гратці титану виникають напруження стиску попереду і під зоною контакту та розтягу – позаду індентора, що призводить до деформації металу і утворення тріщин. Оскільки при електролітичному наводнюванні знижується робота як пружного, так і пластичного деформування, за впливу розтягуючих напружень це призводить до розкриття тріщин на поверхні.

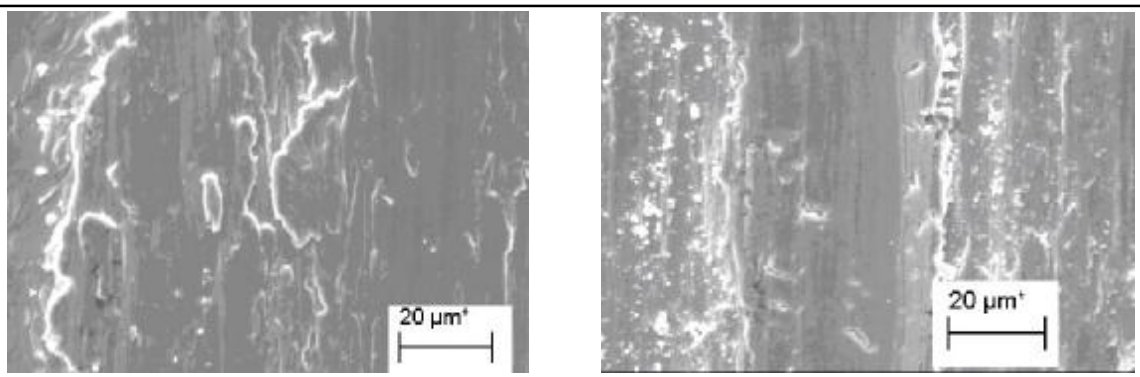
Зміна механічних властивостей поверхневих шарів титану після наводнювання впливає на його трибологічну поведінку. Кінетика коефіцієнта тертя свідчить про зниження сили опору зношуванню наводнених шарів металу порівняно з вихідним станом та нерівномірний характер тертя. Після стирання наводненого шару значення коефіцієнта тертя такі ж, як у вихідного металу (рис. 7, а).

Мікроструктура поверхні тертя титану у вихідному стані свідчить про крихке руйнування поверхневої оксидної плівки з утворенням дрібнодисперсних продуктів зношування та пластичне деформування мікровиступів (рис. 7, б). Поверхня тертя наводнених матеріалів містить численні поперечні тріщини (рис. 7, в).



а

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



б **в**

**Рис. 7 – Кінетика зміни коефіцієнта тертя:
1 – вихідний стан; 2 після наводнювання (а).
Мікроструктура поверхні тертя у вихідному стані (б)
та після електролітичного наводнювання (в)**

Під час ковзання в точках контакту виникають напруження вздовж різних напрямків. На початку формується мікровиступ, розміри якого визначаються силами адгезії зі спряженою поверхнею. Метал у цьому виступі зазнає напружень стиску. При переміщенні виступу максимальні розтягуючі напруження виникають на його задньому краї, а при ковзанні напруження періодично змінюються від стиску до розтягу. Пошкодження поверхні, зумовлені видаленням, проникненням чи витісненням металу при терті ковзання, є місцями зародження тріщин, які поширюються через метал, формуючи частинки зносу.

Висновки

1. Встановлено, що після електролітичного наводнювання титану ВТ1-0 за кімнатної температури за густини струму 1 А/dm^2 протягом 1 хв концентрація водню у поверхневих шарах відповідає граничній, а за 2 А/дм^2 перевищує її у 1,5 рази завдяки утворенню гідридних фаз (TiH_2).

2. Після наводнювання внутрішні напруження у кристалічній гратці титану зростають на 19 %, що призводить до підвищення мікротвердості на 20 % та модуля пружності на 15%. Водночас суттєво (на 40 %) знижується робота відновлення об'єму матеріалом після пружної деформації та на 6 % – пластичної.

3. Зниження роботи пружно-пластичної деформації призводить до зниження опору руйнуванню титану при терті у 2 ... 3 рази порівняно з вихідним станом. Зношування відбувається внаслідок утворення тріщин і крихкого руйнування поверхневих шарів. Після стирання наводненого шару переважає пластична деформація мікровиступів.

Література

1. Беркович И.И., Громаковский Д.Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т. – 2000. – 268 с.

2. Jones J.W., Wert J.J. The effects of gaseous environments on the wear of commercial purity titanium // Wear.– 32. – 1975. – P. 363-377.

3. Фромм Е., Гебхардт Е. Газы и углерод в металлах. – М.: Металлургия, 1980. – 711 с.

4. Birnbaum H.K. Mechanical properties of metal hydrides // J. Less Common Metals. – 104. – 1984. – P. 31-41.

5. Головин Ю.И. Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикрообъемах, тонких приповерхностных слоях и пленках (обзор) // Физика твердого тела. – 2008. – Т.50. – Вып. 12. – С. 2116-2142.

6. Головин Ю.И. Наноиндентирование и его возможности. М.: Машиностроение, 2009. – 312 с.

7. Blau, P. J., Lab Handbook of Scratch Testing, Chapter 7, Scratch Adhesion Testing, Blue Rock Technical Publ., Oak Ridge, TN, 2002, pp. 7.1-7.15.

8. Гольдфайн В.И., Зуев А.М., Клабуков А.Г., Лукина В.П.Влияние окисления и наводораживания на трение и износ титановых сплавов // В сб. А.А. Поляков, Д.Н.Гаркунов Водородный износ в узлах трения. – М.: Наука, 1977. – С. 71-80.

Поступила в редакцию 18.03.2013

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Pokhmursky V.V., Vynar V.A., Vasyliv Kh. B., Zakiev V.I., Ratska N.B. **Peculiarities microstrain of surface layers and mechanisms wear α-titanium under the influence of hydrogen.**

The peculiarities of surface layers microdamage and mechanisms of wear of titanium BT1-0 after electrolytic hydrogenation has been investigated. The concentration of hydrogen in the surface layers of titanium after hydrogenation at current density 1 A/dm^2 during 1 h corresponding equilibrium, and at 2 A/dm^2 exceeds the 1.5 times due to the formation of hydride phases (TiH_2). Internal stress in the crystal lattice of titanium after hydrogenation increased by 19 %, leading to an increase in microhardness by 20 % and modulus by 15 %. At the same time significantly (by 40 %) reduced the volume of material recovery work after the elastic deformation and de 6 % - after the plastic deformation. Reduction of elastic-plastic deformation work leads to reducing friction coefficient of titaqnium in 2 ... 3 times compared with the initial state. Wear occurs due to cracking and brittle fracture of surface layers. The plastic deformation of microasperities dominates after abrasion of hydrogenated layer.

Key words: microstrain of superficial layers, mechanisms of wear, electrolytic flood.

References

1. Berkovich I.I., Gromakovskij D.G. Tribologija. Fizicheskie osnovy, mehanika i tehnicheskie prilozhenija. Samara, Samar. gos. tehn. un-t., 2000. 268 p.

2. Jones J.W., Wert J.J. The effects of gaseous environments on the wear of commercial purity titanium . Wear. No 32 .1975. pp. 363-377.

3. Fromm E., Gebhardt E. Gazy i uglerod v metallah. M. Metallurgija, 1980. 711 p.

4. Birnbaum H.K. Mechanical properties of metal hydrides. J. Less Common Metals. No 104. 1984. pp. 31-41.

5. Golovin Ju.I. Nanoindentirovanie i mehanicheskie svojstva tverdyh tel v submikroob"emah, tonkih pripoverhnostnyh slojah i plenkah (obzor). Fizika tverdogo tela. 2008. T.50.Vyp.12. pp. 2116-2142.

6. Golovin Ju.I. Nanoindentirovanie i ego vozmozhnosti. M.Mashinostroenie, 2009, 312 p.

7. Blau, P. J., Lab Handbook of Scratch Testing, Chapter 7, Scratch Adhesion Testing, Blue Rock Technical Publ., Oak Ridge, TN, 2002, pp. 7.1-7.15.

8. Goldfajn V.I., Zuev A.M., Klabukov A.G., Lukina V.P.Vlijanie okislenija i navodorazhivanija na trenie i iznos titanovyh splavov. V sb. A.A. Poljakov, D.N.Garkunov Vodorodnyj iznos v uzlah trenija, M. Nauka, 1977, pp. 71-80.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com