

**Винар В.А.**

Фізико-механічний інститут  
ім. Г.В. Карпенка НАН України,  
м. Львів, Україна  
E-mail: vynar@ipm.lviv.ua

**ЗМІНА МІКРОМЕХАНІЧНИХ  
ВЛАСТИВОСТЕЙ НІКЕЛЮ ТА ЙОГО  
ТРИБОЛОГІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ  
В РЕЗУЛЬТАТІ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНОГО  
НАВОДНЮВАННЯ**

УДК 620.178.16

Вивчено вплив електролітичного наводнювання на мікромеханічні характеристики та трибологічну поведінку поверхневих шарів нікелю. Встановлено, що після електролітичного наводнювання в поверхневих шарах нікелю відбуваються зміни, які проявляються у зниженні пластичності і зростанні мікротвердості матеріалу. В результаті електролітичного наводнювання нікелю зі збільшенням густини струму наводнювання його мікротвердість збільшується, а зносотривкість зменшується. Поверхнєве руйнування при терті наводненого матеріалу відбувається внаслідок тріщиноутворення та абразивного впливу твердих і крихких продуктів зношування.

**Ключові слова:** електролітичне наводнювання, нікель, пластичність, мікротвердість, коефіцієнт тертя, зношування.

**Вступ**

Основна частина деталей обладнання виходить із ладу не через втрату міцності, а внаслідок зношування. Тертя твердих тіл або контакт із газоподібним чи рідким середовищем супроводжується зміною властивостей поверхневих шарів, а як наслідок і зміною трибологічної поведінки. Одним із факторів, які суттєво впливають на процеси тертя зношування є водневий чинник [1 - 3]. Спільно з нерівноважними процесами, що проходять при деформації поверхневого шару металу, створюються теплові градієнти, електричні та магнітні поля і поля напружень. Це призводить до дифузії водню в метал, концентрації його в приповерхневих шарах і прискореного зносу.

Область прояви водневого зношування обширна [1]. Особливо інтенсивному зношуванню можуть піддаватися вузли тертя, що змащуються водою і працюють в хімічній та нафтогазовидобувній промисловостях. Наявність у повітрі парів води також може створювати сприятливі умови для водневого зношування, не кажучи вже про розкладання в зоні контактування мастила, палива або пластмаси. Використання водню як палива, особливо у транспортній промисловості, збільшує спектр обладнання та матеріалів, що працюють у безпосередньому контакті з воднем під час фрикційної взаємодії [4].

Мета даної роботи – дослідити вплив попереднього електролітичного наводнювання на зміну фізико-механічних властивостей поверхневих шарів та фрикційну взаємодію нікелю.

**Методика досліджень**

Електролітичне наводнювання зразків нікелю проводили попередньо шляхом катодної поляризації з використанням платинових анодів за кімнатної температури в 1 Н розчині  $H_2SO_4$  з 10 мг/л  $As_2O_3$ . Тривалість поляризації 1 година, густина струму 1,0 ... 2,0 А/дм<sup>2</sup>.

Трибологічні дослідження пластинчатих зразків розміром 50 × 40 × 5 мм проводили за схемою тертя "площина - сфера" на установці зі зворотно-поступальним переміщенням контактуючих поверхонь [5]. Навантаження на індентор (матеріал  $Al_2O_3$ ,  $d = 9$  мм) становило 1 Н. Визначали коефіцієнт тертя та втрати матеріалу за шириною утвореної в процесі тертя доріжки.

Зміну мікромеханічних властивостей нікелю проводили на пристрої для вивчення фізико-механічних властивостей поверхневих шарів матеріалів "Микрон - гамма" [6]. Топографічні дослідження проводили за допомогою безконтактного інтерференційного 3-D профілографа "Micron - alpha" [7].

Рентгеноструктурний аналіз поверхні матеріалів здійснювали на дифрактометрі ДРОН-3М у  $Cu-K\alpha$  випромінюванні. Електронномікроскопічні дослідження структури нікелю і поверхонь тертя проводили на сканівному електронному мікроскопі EVO-40XVP (Carl Zeiss) з системою рентгенівського мікроаналізу INCA Energy.

**Експериментальні результати та їх обговорення**

Нікель здатний поглинати великі об'єми водню, причому, в результаті утворюються тверді розчини, які змінюють властивості металу. Так, в результаті електролітичного наводнювання поверхні нікелю (1 години за густини струму 1 А/дм<sup>2</sup>) спостерігається утворення чітко вираженої зміненої ділянки глибиною 10 - 15 мкм (рис. 1, б). При порівняннях зерен нікелю у вихідному стані (рис. 1, а) та після наводнювання (рис. 1, б), встановлено появу неоднорідних темних ділянок округлої форми розміром 0,5 - 1 мкм, наявність яких свідчить про структурні зміни у матеріалі.

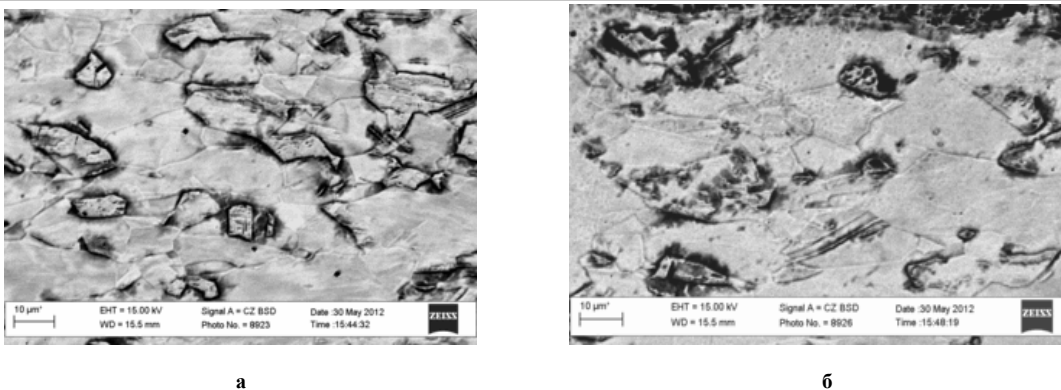


Рис. 1 – Мікроструктура поперечного перерізу ненаводненого (а) і наводненого (густина струму  $1\text{ А/дм}^2$ , час – 1 година) (б) нікелю (BSD - зображення)

Встановлено, що після електролітичного наводнювання нікелю його мікротвердість підвищується зі збільшенням густини струму і тривалості наводнювання (рис.2). Так, зі зростанням густини струму наводнювання до  $2\text{ А/дм}^2$  за тривалості 1 година мікротвердість підвищується на  $\sim 38\%$ . Зі зміною часу наводнювання до 3 годин за густини струму  $1\text{ А/дм}^2$  вона зростає на  $\sim 34\%$ . Таким чином, зростання густини струму та часу наводнювання, сприяють зростанню мікротвердості поверхневих шарів, однак із підвищенням режимів катодної поляризації швидкість її зміни знижується.

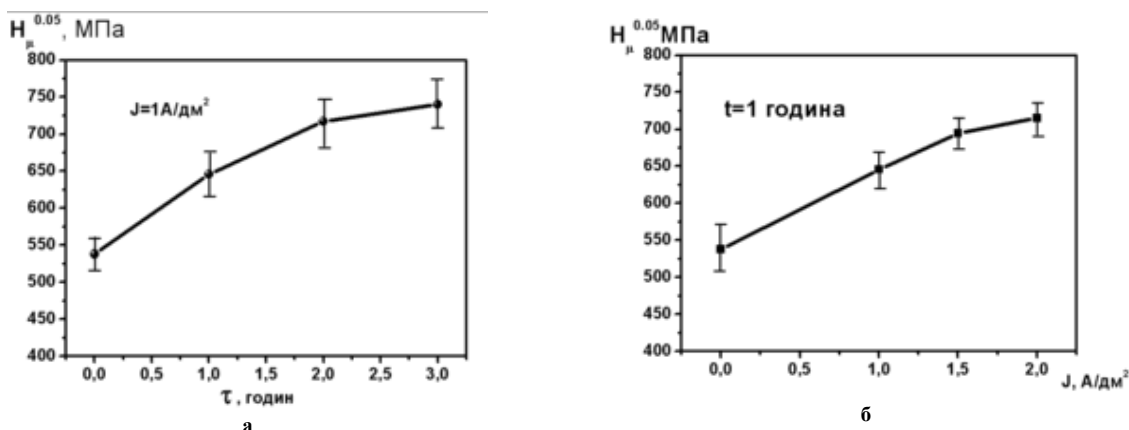


Рис. 2 – Вплив густини струму(а) та часу (б) електролітичного наводнювання на мікротвердість нікелю

Рентгеноструктурним аналізом поверхні встановлено, що у поверхневих шарах міжплощинні відстані у кристалічній ґратці нікелю у вихідному стані становлять  $0,35275\text{ нм}$ , в результаті наводнювання відбувається розширення рефлексів дифрактограм та збільшення їх інтенсивності, що пов'язано з розчиненням водню у дефектах структури та кристалічній ґратці (рис. 3, а). Воно супроводжується збільшенням міжатомних відстаней (рис. 3, б) і виникненням внутрішніх напружень.

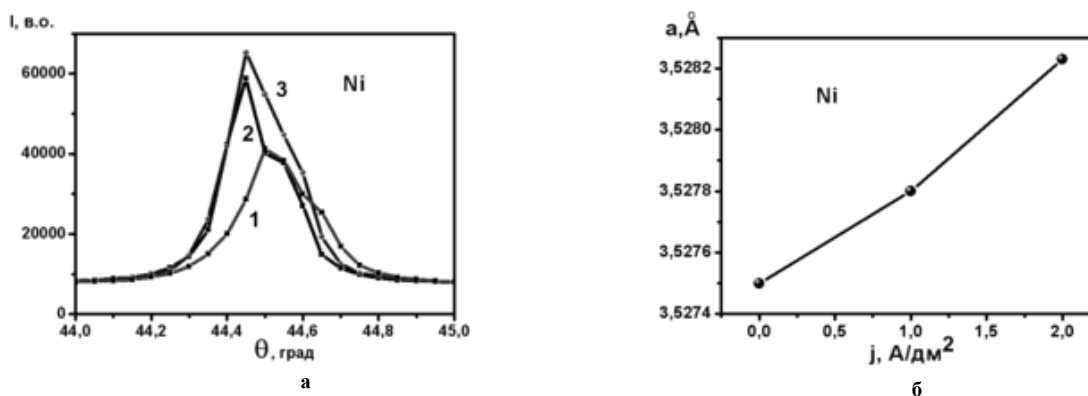


Рис. 3 – Зміна конфігурації рефлексів рентгенограм (а) та параметрів ґратки (б) нікелю після електролітичного наводнювання протягом 1 години: 1 – вихідний; 2 –  $1\text{ А/дм}^2$ ; 3 –  $2\text{ А/дм}^2$

Після наводнення параметр ґратки нікелю зростає несуттєво (до 0,352755 і 0,352823 нм з підвищенням густини струму від 1 до 2 А/дм<sup>2</sup>), що виключає утворення гідридних фаз, які розширюють ґратку на 0,01 нм [3].

Для визначення механічних властивостей поверхневих шарів застосовували дюрометрію та метод динамічного інденування [6]. Він ґрунтується на автоматичній реєстрації діаграми навантаження  $P = f(h)$ , де  $P$  – навантаження на індентор,  $h$  – глибина його впровадження у поверхню досліджуваного матеріалу (рис. 4, а). Основна перевага методу полягає в тому, що твердість визначається в момент максимального заглиблення наконечника ( $h_{\max}$ ), тобто до початку пружного відновлення матеріалу. Діаграма дає інформацію про роботу, витрачену індентором на подолання опору матеріалу  $A_{\text{пласт}}$  і роботу, витрачену матеріалом на відновлення своїх властивостей  $A_{\text{пруж}}$ . За цими даними визначають ступінь пластичності поверхні  $\varepsilon$  згідно формули  $\varepsilon = (A_{\text{пласт}} - A_{\text{пруж}}) / A_{\text{пласт}}$ . Значення мікротвердості за Меєром знаходиться як відношення максимального навантаження  $P_{\max}$  до площі проекції відбитка  $A$ ; модуль Юнга визначається, як  $E = S / 2\sqrt{\pi/A}$ , де  $S$  – тангенс кута нахилу початкової ділянки кривої розвантаження.

Як показали дослідження (рис. 4, а, табл.), що наводнення підвищує модуль пружності на ~5 % та роботу пружної складової на ~12 %, робота пластичної складової  $A_{\text{пласт}}$  та коефіцієнт пластичності знижуються на 12 %. Спостерігається зростання напружень у поверхневих шарах нікелю на 7 % в порівнянні з металом у вихідному стані.

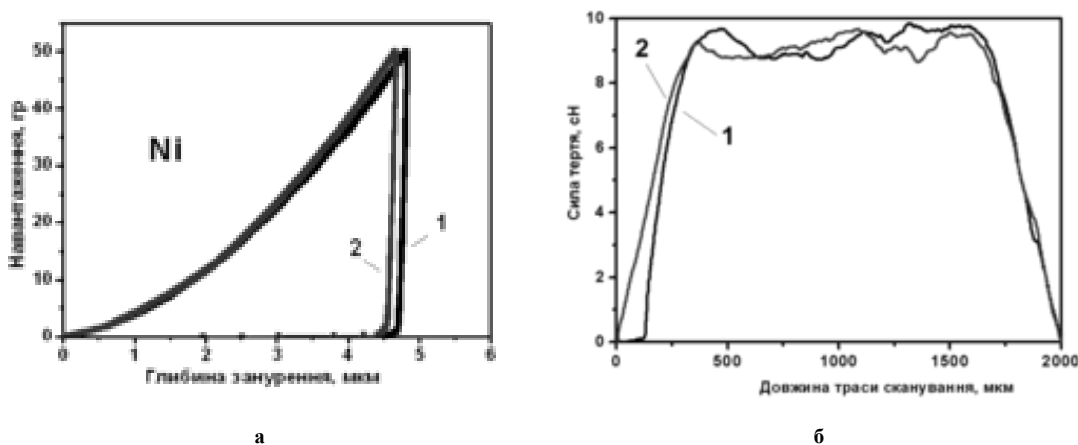


Рис. 4 – Залежність сили тертя від шляху по треку взаємодії індентора з поверхнею титану (а), 3D (б, в) профілограми сліду від індентора:  
1 – метал у вихідному стані;  
2 – після наводнення за густини струму 1 А/дм<sup>2</sup> та часу 1 година

Таблиця

#### Характеристики нікелю визначені за динамічного інденування

Найменування	$h_1$ , мкм	$h_2$ , мкм	$H$ , (Мейер)	$E$ , ГПа	$A_{\text{пласт}}$	$A_{\text{пруж}}$	$\varepsilon$	$\sigma_n$ , ГПа
Ni вихідний	4,794	4,717	0,898	178,680	89,936	8,798	0,898	0,231
Ni наводнення	4,767	4,685	0,956	184,600	80,558	9,972	0,803	0,246

Примітка:  $h_{\max}$  – максимальне заглиблення наконечника;  $h_f$  – глибина відбитка;  $H_{\text{Меєр}}$  – мікротвердість за Меєром;  $E$  – модуль Юнга;  $A_{\text{пласт}}$  і  $A_{\text{пруж}}$  – робота пластичної і пружної деформацій;  $\varepsilon$  – ступінь пластичності поверхні;  $\sigma_n$  – внутрішні напруження (наводнення 1А/дм<sup>2</sup>, 1 година).

В результаті скретч досліджень виявлено несуттєві відмінності між середніми значеннями сили тертя нікелю у вихідному стані – 9,6 сН та після наводнення – 9,3 сН (рис. 4, б). Дослідження треків, сформованих від контакту піраміди з поверхнею, показали, що для ненаводненого нікелю характерний більш пластичний вихід матеріалу із зони контактування (рис. 5), який супроводжується поширенням пластичної деформації на відстань до 70 мкм у різних напрямках від осі переміщення індентора. Видавлювання матеріалу через більшу адгезійну складову проходить нерівномірно, тоді як після наводнення

ня, внаслідок окрихчення, відбувається інтенсивніший вихід матеріалу із зони контакту по осі прикладення нормальних навантажень, і гребені виходу матеріалу є рівномірніші.

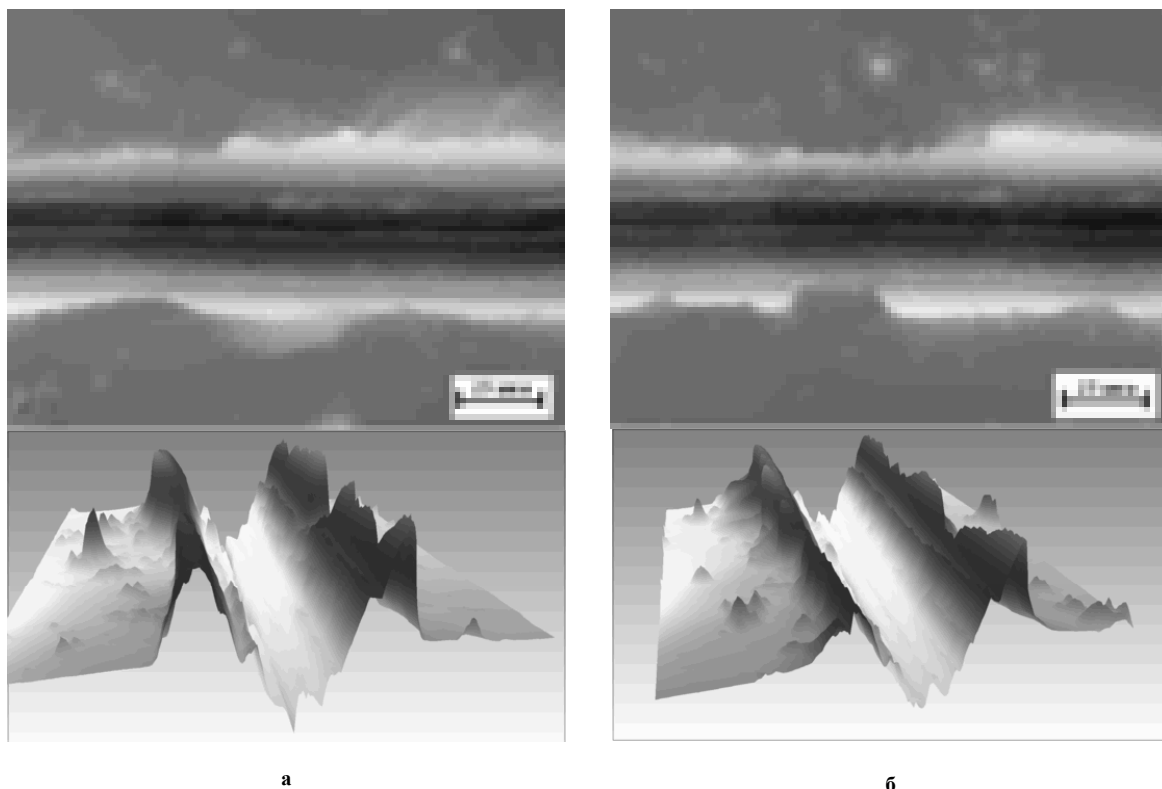


Рис. 5 – Видяк треку сформованого від контакту індентора і поверхні нікелю та його 3D профілограми:  
а – метал у вихідному стані;  
б – після наводнювання за густини струму  $1 \text{ A/дм}^2$  та часу 1 година

Таким чином, електролітичне наводнювання технічно чистого нікелю знижує пластичність поверхневих шарів нікелю, що проявляється у його трибологічній поведінці (рис. 6). Зі зростанням густини струму наводнювання спостерігається зростання коефіцієнта тертя від 0,4 до 0,6 в початковий період контактної взаємодії. Ця тенденція зберігається на протязі 600 секунд, але зі зростанням часу досліджень зміна значень коефіцієнта тертя починає набирати стрибкоподібного характеру, що викликане накопиченням пошкоджуваності та продуктів зношування в зоні тертя (рис. 7). Для втрат матеріалу властива чітка закономірність, зі збільшенням густини струмів наводнювання нікелю ширина треку тертя зростає і становить  $786 \text{ мкм}$  ( $2 \text{ A/дм}^2$  – 1 година), що на 20 % більше ніж для матеріалу у вихідному стані ( $650 \text{ мкм}$ ).

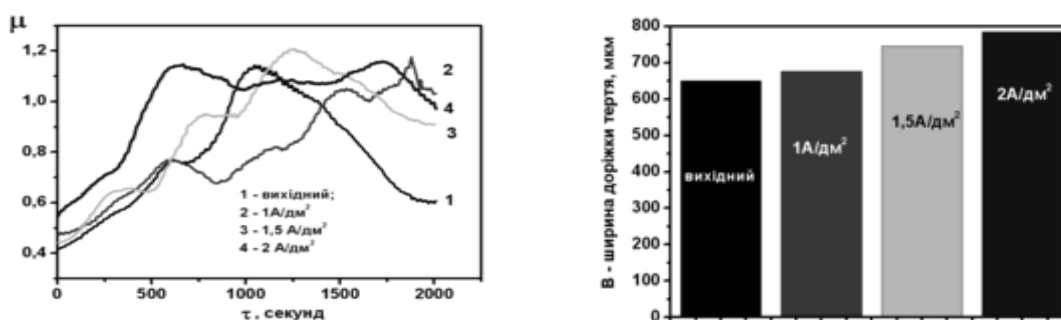


Рис. 6 – Залежність коефіцієнта тертя та втрат матеріалу нікелю від густини струму наводнювання (час наводнювання 1 год)

Аналіз поверхонь тертя матеріалу у вихідному стані свідчить про сліди пластичної деформації, а також наявність значної кількості дрібнодисперсних частинок, крихких продуктів зношування (рис. 7).

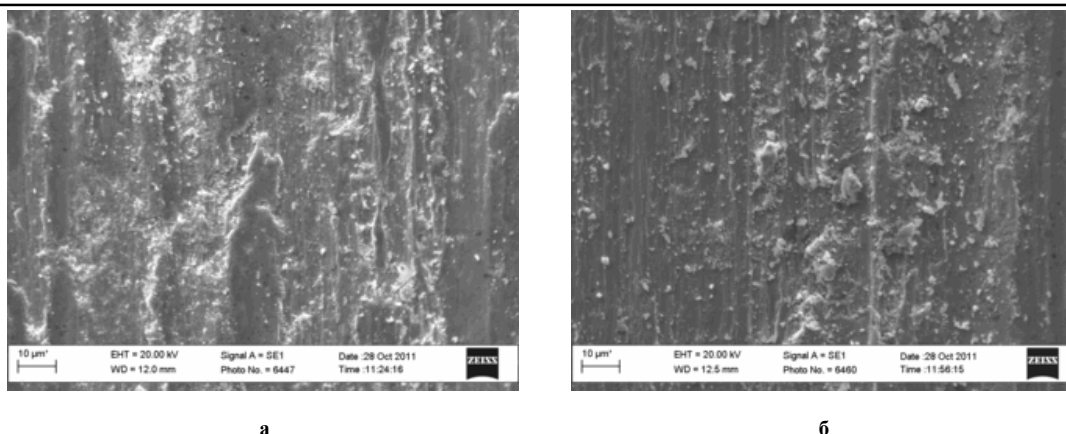


Рис. 7 – Мікроструктура поверхні тертя нікелю у вихідному стані (а) і після наводнювання за густини струму  $2\text{A}/\text{дм}^2$  протягом 1 год (б)

Для нікелю після наводнювання характерне зниження площі пластичного деформування поверхні, та утворення тріщин з наступним інтенсивним руйнуванням у вигляді дисперсних частинок, які виступають додатковим абразивом у зоні тертя за рахунок більшої твердості.

### Висновки

Встановлено, що після електролітичного наводнювання в поверхневих шарах нікелю змінюється структура, яка проявляється у зниженні пластичності і зростанні мікротвердості матеріалу.

В результаті електролітичного наводнювання нікелю зі збільшенням густини струму наводнювання його мікротвердість збільшується, а зносотривкість зменшується. Поверхнєве руйнування при терті наводненого матеріалу відбувається внаслідок тріщиноутворення та абразивного впливу твердих і крихких продуктів зношування.

### Література

1. Гаркунов Д.Н. и др. Водородное изнашивание деталей машин: Монография / Д.Н.Гаркунов, Г.И.Суранов, Ю.А.Хрусталеv. – Ухта: УГТУ, 2003. – 199 с.
2. Pokhmurskii V.I. Effects of hydrogen exposure on the mechanical and tribological properties of  $\alpha$ -titanium surfaces./ V.I. Pokhmurskii, V.A. Vynar, Ch.B. Vasylyv, N.B. Ratska // Wear, Volume 306, Issues 1–2, 30 August 2013, Pages 47-50.
3. Федоров В.В. Вплив водню на фазовий склад та фізико-механічні властивості конструкційних матеріалів / В.В. Федоров // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2010 – № 2. – С. 67-76.
4. [http://hydrogenius.kyushu-u.ac.jp/ci/event/ihdf2014/pdf/tri11p\\_ono.pdf](http://hydrogenius.kyushu-u.ac.jp/ci/event/ihdf2014/pdf/tri11p_ono.pdf)
5. Винар В. А. Методичні особливості трибокорозійних досліджень / В. А. Винар, В.М. Довгунік, М.М. Студент // ФХММ, 2010. – №5. – С. 59-64.
6. Игнатович С.Р. Методика исследования физико-механических свойств поверхностных слоев материалов при усталости с использованием многофункционального прибора «МикронГамма» / С.Р. Игнатович, И.М. Закиев, Д.И. Борисов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – №8 (16). – С. 163-166.
7. Закиев И.М. Применение бесконтактного 3D профилометра «Micron-beta» для точного определения износа. / И.М. Закиев // Проблемы трения и износа. – 2010. – № 52. – С. 192-198
8. Мардаревич Р.С. Вплив електролітичного наводнювання на зношування гальванічних покриттів на основі нікелю / Р.С. Мардаревич, В.А. Винар, М.Я. Головчук, Я.Я. Сірак // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2012. – Спец. випуск. – Т.2. – №9. – С. 588-592.

Поступила в редакцію 01.12.2015

**Vynar V.V. Changes of nickel micromechanical properties and tribological characteristics after electrolytic hydrogenation.**

Electrolytic hydrogenation influence on micromechanical properties and tribological behavior of nickel surface layers was studied. It was established that the treatment causes changes of nickel surface layers which are shown in increase of microhardness and decrease of ductility of the material. Nickel microhardness is increased and its wear resistance decreased with rising of hydrogenation current density. Surface destruction of the hydrogenated material takes place due abrasion effect of hard and brittle wear products and cracks development.

**Keywords:** electrolytic hydrogenation, nickel, nanoindentation, microhardness, friction coefficient, wear.

**References**

1. Garkunov D.N., Suranov G.I., Xrustalev Yu.A. Vodorodnoe iznashyvanie detalej mashyn. Monografiya. Ukhta. UGTU, 2003. 199 s.
2. Pokhmurskii V.I., Vynar V.A., Vasyliv Ch.B., Ratska N.B. Effects of hydrogen exposure on the mechanical and tribological properties of  $\alpha$ -titanium surfaces. *Wear*, Volume 306, Issues 1 - 2, 30 August 2013, Pages 47-50.
3. Fedorov V.V. Vplyv vodnyu na fazovyj sklad ta fizyko-mekhanichni vlastyivosti konstrukciynykh materialiv. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv*. 2010 №2. S. 67-76.
4. [http://hydrogenius.kyushu-u.ac.jp/ci/event/i hdf2014/pdf/tri11p\\_ono.pdf](http://hydrogenius.kyushu-u.ac.jp/ci/event/i hdf2014/pdf/tri11p_ono.pdf)
5. Vynar V. A., Dovgunyk V.M., Student M.M. Metodychni osoblyvosti trybokorozijnyx doslidzhen. *FKhMM*, 2010. №5. s.59–64.
6. Ignatovych S.R., Zakyev I.M., Borysov D.I. Metodika Metodyka issledovaniya fizyko-mekhanicheskykh svojstv poverxnostnykh sloev materyalov pry ustalosty s ispol'zovaniem mnogofunkcional'nogo pribora «MikronGamma». *Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2004. №8 (16). S. 163-166.
7. Zakiev I.M. Primenenie beskontaktnogo 3D profylometra «Micron-beta» dlya tochnogo opredeleniya iznosa. *Problemy treniya i iznosa*. 2010. № 52. S. 192-198
8. Mardarevych R.S., Vynar V.A., Golovchuk M.Ja., Sirak Ja.Ja. Vplyv elektrolitychnogo navodnyuvannya na znoshuvannya gal'vanichnyh pokryttiv na osnovi nikelju. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv*. 2012. Spec. vypusk. T.2. №9. S. 588–592.