

УДК 620.178.162.42

**В.А. Винар, М.Я. Головчук, Л.А. Арендар, Н.Б. Рацька, Х.Б. Василів**  
**ТРИБОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ОКСИДОВАНОГО СПЛАВУ СИСТЕМИ Ti-Nb-Al**  
**ЗА РІЗНИХ УМОВ НАВОДНЮВАННЯ**

*Досліджували вплив хіміко-термічної обробки оксидуванням на трибологічну поведінку сплаву системи Ti-Nb-Al за водневого впливу. Виявлено підвищену зносотривкість сплаву після оксидування за температури 500 °С, яка забезпечується формуванням складних оксидів у підповерхневому шарі і підвищенням мікротвердості на 22...23%.*

*В умовах тертя без мащення на повітрі коефіцієнт тертя оксидованого сплаву у 5 разів нижчий, ніж вихідного. При електролітичному наводнюванні спостерігається додаткове зміцнення поверхневих шарів розчиненим воднем, що покращує трибологічні властивості матеріалу.*

*При терті в атмосфері водню підвищена зносотривкість спостерігається лише на початковому етапі. За тривалих випроб тертям при пошкодженні твердого оксидного шару і проникненні водню вглиб сплаву спостерігається утворення тріщин і пониження зносотривкості.*

*Ключові слова:* наводнювання, тертя, сплав системи Ti-Nb-Al, коефіцієнт тертя, мікротвердість, фрикційна поверхня, мікроструктура.

*Рис. 9. Літ. 8.*

**В.А. Винар, М.Я. Головчук, Л.А. Арендар, Н.Б. Рацька, Х.Б. Василів**  
**ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОКСИДИРОВАННОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Ti-Nb-Al**  
**ПРИ РАЗНЫХ УСЛОВИЯХ НАВОДОРОЖИВАНИЯ**

*Исследовали влияние химико-термической обработки оксидированием на трибологическое поведение сплава системы Ti-Nb-Al при воздействии водорода. Выявлено повышение износостойкости сплава после оксидирования при температуре 500 °С вследствие формирования сложных оксидов в подповерхностном слое и повышения микротвердости на 22 ... 23%.*

*В условиях трения без смазки на воздухе коэффициент трения оксидированного сплава в 5 раз ниже, чем исходного. При электролитическом наводороживании наблюдается дополнительное укрепление поверхностных слоев растворенным водородом, что улучшает трибологические свойства материала.*

*При трении в атмосфере водорода повышенная износостойкость наблюдается только на начальном этапе. При длительных испытаниях трением после повреждения твердого оксидного слоя и проникновения водорода вглубь сплава наблюдается образование трещин и понижение износостойкости.*

*Ключевые слова:* наводороживание, трение, сплав системы Ti-Nb-Al, коэффициент трения, микротвердость, фрикционная поверхность, микроструктура.

**V. Vynar, M. Golovchuk, L. Arendar, N. Ratska, Ch. Vasylyiv**  
**TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF OXIDIZED ALLOY Ti-Nb-Al SYSTEM**  
**UNDER DIFFERENT HYDROGENATION CONDITIONS**

*The effects of chemical and thermal oxidation treatment on tribological behavior of the alloy Ti-Nb-Al affected by hydrogen has been investigated. The increase of the wear resistance of the alloy after oxidation at 500 °C due to the formation of complex oxides in the subsurface and micro-hardness increase by 22 ... 23% has been found.*

*In condition of friction without lubrication in air friction oxidized alloy is 5 times lower than the original. After electrolytic hydrogenation additional strengthening of surface layers of dissolved hydrogen has been observed, which improves the tribological properties of the material.*

*High wear resistance occurs only at the initial stage of the friction in the atmosphere of hydrogen. At long time cracking and wear reduction is observed as result of damage of solid oxide layer and hydrogen penetration into the material.*

*Keywords:* hydrogenation, friction alloy system Ti-Nb-Al, coefficient of friction, microhardness, frictional surface microstructure.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сплави системи Ti-Nb-Al перспективні для енергетики, авіа-, ракетобудування завдяки жаротривкості, жароміцності, високій корозійній стійкості та ряду інших унікальних властивостей.

Для покращення фізико-хімічних і механічних властивостей деталей із тугоплавких сплавів та підвищення їх роботоздатності застосовують спеціальні покриття різного роду. Зокрема, за допомогою хіміко-термічної обробки киснем можна досягнути значного підвищення жаростійкості, поверхневої міцності, зносотривкості матеріалу [1-7]. Оксидні фази, присутні у сплавах, можуть відігравати роль бар'єрних шарів, які перешкоджають дифузії елементів вглиб металу та нівелюють їх імовірний негативний вплив. Тому у результаті оксидування виробів із сплавів на основі Ti-Nb-Al слід очікувати покращення їх експлуатаційних властивостей за водневого впливу.

Оскільки сплави на основі ніобію використовують в енергетичній промисловості для виготовлення вузлів, що працюють в умовах агресивного водневого впливу, то дослідження трибологічних властивостей оксидованого сплаву системи Nb-Ti-Al за дії водню є важливим

© В.А. Винар, М.Я. Головчук, Л.А. Арендар, Н.Б. Рацька, Х.Б. Василів

напрямком досліджень [3,5,7,8]. Вплив водневого чинника на трибологічну поведінку матеріалів створюють або попереднього електролітичного наводнюючи їх, або вміщуючи вузол тертя у камеру з воднем.

Мета роботи – дослідити трибологічну поведінку окисованого титан-ніобієвого сплаву ВН-10 за різних умов водневого впливу.

**Методика експериментальних досліджень.** Досліджували сплав системи Nb–Ti ВН-10 (40...45 мас.% Ti; 6,7...7,3 мас.% Al; 3,5...4,4 мас.% V; 1,8 мас.% Zr; 0,13 мас.% O; 0,0018...0,24 мас.% C; решта Nb). Хіміко-термічну обробку окисиданням виконували у печі типу СНОЛ 1.6.2, 5.1/9-ІЗ за температури 373...1373 К упродовж 1 год на повітрі. Мікроструктуру сплаву вивчали на оптичному мікроскопі "Neophot-2", скануючому електронному мікроскопі EVO 40XVP з системою мікрорентгеноспектрального аналізу на енергодисперсійному рентгенівському спектрометрі INCA ENERGY 350. ДюрOMETричні вимірювання виконували за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3.

Випробовували тертям за умов реверсивного руху для схеми тертя «кулька-площина». Навантаження 2 Н, швидкість ковзання індентора 1,6 мм/с, тривалість випробувань 2000 с. Контртіло – кулька з  $Al_2O_3$  діаметром 8 мм. Вплив водневого чинника на трибологічну поведінку матеріалу досліджували на повітрі, попередньо наводнюючи його електролітичним способом, а також в атмосфері водню за тиску 0,1 МПа. Електролітичне наводнювання реалізували шляхом катодної поляризації в 1N розчині  $H_2SO_4$  з 10 мг/л триоксиду миш'яку для інгібування рекомбінації водню на поверхні. Тривалість поляризації 1 год, густина струму 1,0 ... 5,0 А/дм<sup>2</sup>.

#### Результати експериментальних досліджень та їх обговорення.

Досліджували вплив поверхневого зміцнення сплаву ВН-10 окисиданням на його зносотривкість за водневого впливу.

Попередньо аналізували вплив температури окисидання на трибологічну поведінку досліджуваного сплаву на повітрі. Для цього визначали кінетику зміни коефіцієнта тертя та ширину доріжок зношування. У сплаву, окисиданого за температури 300°C коефіцієнт тертя практично рівний 1, що свідчить про адгезійну взаємодію поверхонь, характерну для вихідного матеріалу. Крайні показники отримано після окисидання за температури 400°C – коефіцієнт тертя не перевищує 0,5 (рис. 1). Найнижчі коефіцієнти тертя зафіксовано після термообробки за температури 500 і 700°C.

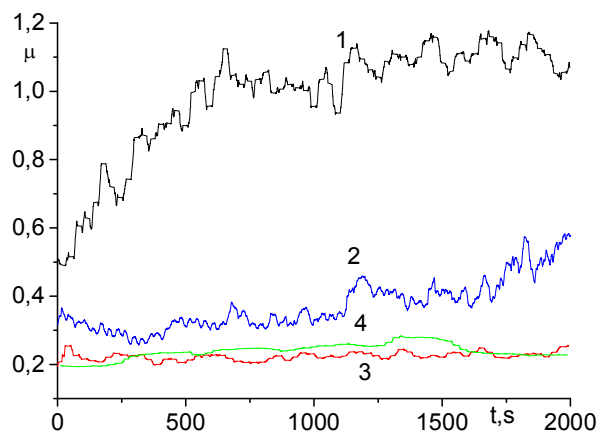


Рис. 1. Вплив температури окисидання на кінетику зміни коефіцієнта тертя сплаву ВН-10: 1 – 300°C; 2 – 400°C; 3 – 500°C; 4 – 700°C

Мікроструктура поверхні тертя окисиданого за 300°C сплаву свідчить про захоплення поверхонь, містить велику кількість продуктів зношування (рис.2,а). Поверхні зони тертя окисиданих за 500°C і 700°C сплавів гладкі, практично без продуктів зношування (рис.2,б). Відповідно змінюється ширина доріжок тертя: після термообробки за температури 300°C вона рівна 991,19 мкм, за 500°C – 269,06 мкм, а за 700°C – 312,97 мкм.

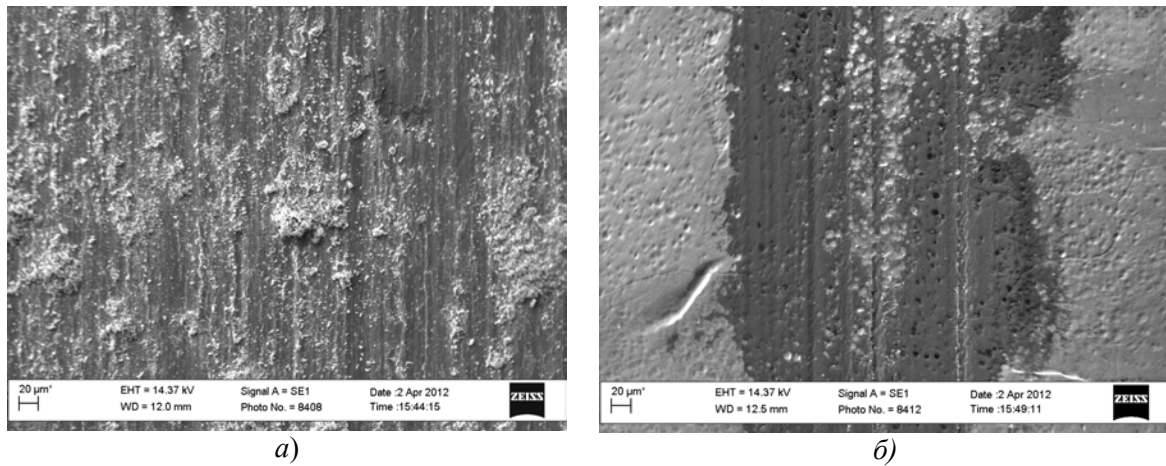
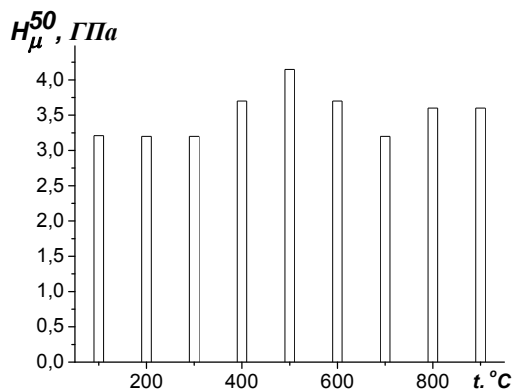
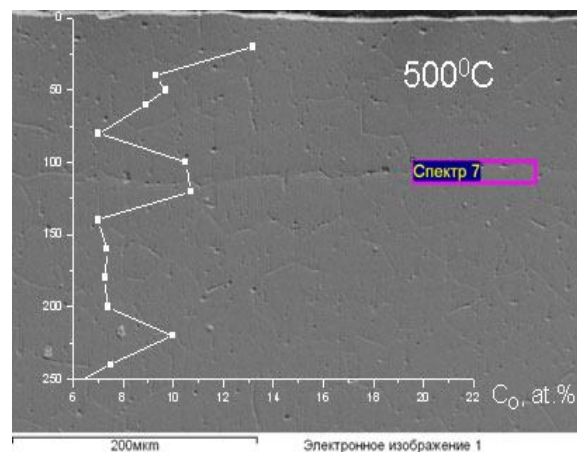


Рис. 2. Мікроструктура поверхні тертя сплаву окисованого за 300°C (а) і за 700°C (б)

Підвищена зносостійкість сплаву після хіміко-термічної обробки за температури 500°C забезпечується формуванням складних оксидів ( $Ti_{0,4}Al_{0,3}Nb_{0,3}O_2$ ,  $TiNb_2O_7$ ) у підповерхневому шарі [4] і корелює з мікротвердістю поверхні, яка на 10-20 % вища, ніж після окисування за інших режимів (рис.3,а). Концентрація кисню у зміцненому шарі досягає 14 ат. % (рис.3,б). Підвищений вміст кисню на границі дифузійної зони може свідчити про зустрічні потоки дифузії кисню при хіміко-термічній обробці: з повітря – вглиб металу і розчиненого в матриці – до поверхні.



а)



б)

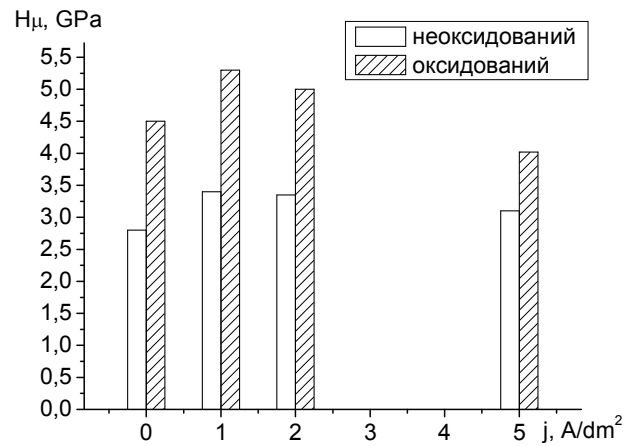
Рис. 3. а) поверхнева мікротвердість поверхні сплаву ВН-10, окисованого за різних температур; б) мікроструктура та розподіл концентрації кисню по глибині окисованого за 500°C сплаву

Сплав, окисований за температури 500°C, що забезпечує найвищу мікротвердість та зносотривкість, наводнювали електролітично впродовж 1 год за густини струму 1,2 і 5 А/дм<sup>2</sup>.

Встановлено, що після наводнювання за густини струму 1 і 2 А/дм<sup>2</sup> мікротвердість сплаву підвищується відповідно на 20 і 10 %. Зі зростанням густини струму до 5 А/дм<sup>2</sup> вона знижується до 0,9 від вихідної. У неокисованого сплаву після наводнювання мікротвердість підвищується в 1,2...1,3 рази (рис. 4).

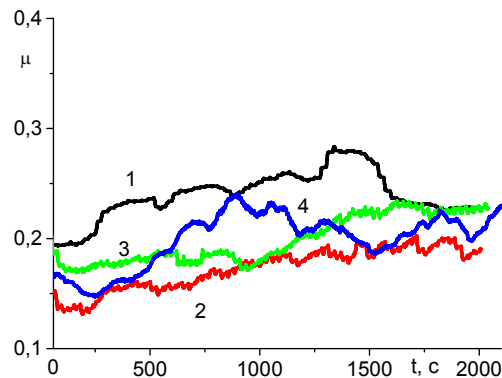
Збільшення мікротвердості при наводнюванні може бути пов'язано з розчиненням водню в кристалічній ґратці, оскільки гідридних фаз за даних умов наводнювання не виявлено. Імовірна причина зниження мікротвердості зі збільшенням густини струму наводнювання – відновлення іонізованим воднем вищих оксидів у поверхневих шарах сплаву до нижчих.

Поверхнєве зміцнення матеріалу проявляється у його трибологічній поведінці. Так, при терті неокисованого сплаву як у вихідному стані, так і після наводнювання значення коефіцієнта тертя досягають 0,8...1,0, а мікроструктура поверхні свідчить про адгезійний характер зношування [7].

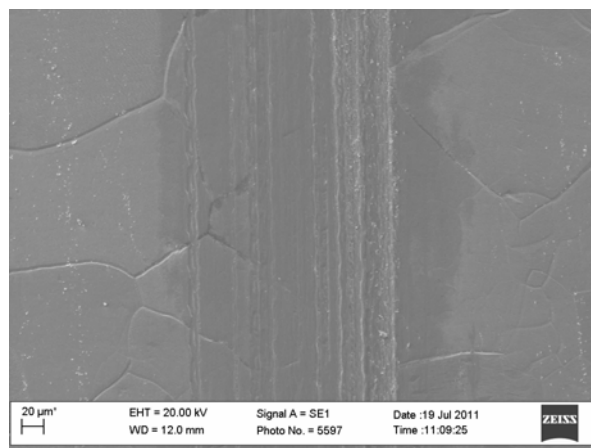


**Рис. 4. Вплив густини струму наводнювання на мікротвердість сплаву ВН-10 у вихідному стані та після оксидування**

Після хіміко-термічної обробки сплаву оксидуванням його зносотривкість підвищується. Коефіцієнти тертя як ненаводненого, так і наводненого металу стабільні впродовж всього часу випроб і не перевищують 0,2 (рис. 5), ширина доріжки тертя зменшується у 2...3 рази порівняно з вихідним станом. Мікроструктура поверхні тертя наводненого оксидованого сплаву гладка, з локальними ділянками дрібнодисперсних продуктів зношування (рис. 6). Збільшення густини струму електролітичного наводнювання сплаву до 5 А/дм<sup>2</sup> практично не впливає на характер зміни коефіцієнтів тертя як у вихідному стані так і після оксидування.



**Рис. 5. Вплив густини струму наводнювання на коефіцієнти тертя оксидованого сплаву ВН-10: 1 – вихідний стан; 2 – 1А/дм<sup>2</sup>; 3 – 2 А/дм<sup>2</sup>; 4 – 5 А/дм<sup>2</sup>**



**Рис. 6. Типова мікроструктура поверхні тертя оксидованого сплаву ВН-10 після наводнювання**

Для порівняння параметри зношування сплаву ВН-10 у вихідному стані та після хіміко-термічної обробки оксидуванням досліджували в атмосфері водню (тиск 0,1 МПа) за такого ж навантаження і швидкості переміщення.

Встановлено, що під час тертя у водні неоксидованого сплаву значення коефіцієнта тертя трибопарі коливаються в околі 1,0. Поверхня тертя свідчить про схоплювання поверхонь (рис.7). Ширина доріжки після 2000 с тертя досягає 480 мкм.

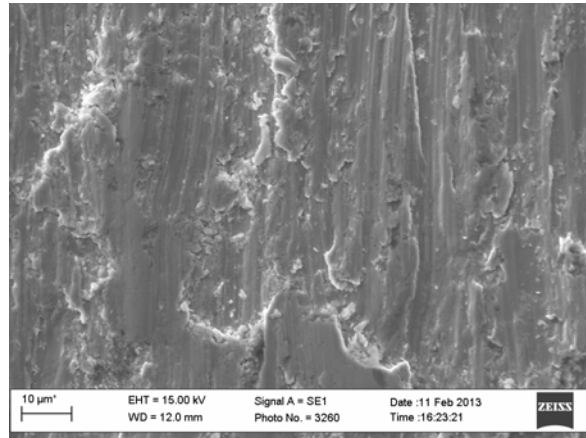


Рис. 7. Мікроструктура поверхні тертя сплаву ВН-10 після тертя в атмосфері водню

При терті зміцненого шару в оксидованого сплаву значення коефіцієнта тертя коливаються в межах до 0,2...0,3 (рис.8). Поверхня тертя гладка, не містить продуктів зношування (рис. 9, а).

За більш тривалих випроб тертям після стирання зміцненого шару, товщина якого становить 100 мкм, середнє значення коефіцієнта тертя зростає до 0,6...0,7 (рис.8). На поверхні тертя спостерігаються численні тріщини та продукти зношування, у складі яких міститься до 70 ат. % кисню (рис.9,б).

Імовірно, при пошкодженні твердого поверхневого оксидного шару і утворенні ювенільної активованої поверхні створюються умови для проникнення водню вглиб сплаву. При цьому можуть утворюватися гідридні фази титану і ніобію, що призводить до зміни параметрів ґратки, виникнення внутрішніх напружень, які при накладанні зовнішнього знакозмінного навантаження при терті ініціюють тріщиноутворення. Крім того, тверді продукти зношування, які утворюються при руйнуванні оксидованого шару, відіграють роль абразиву при терті, що призводить до пониження зносотривкості.

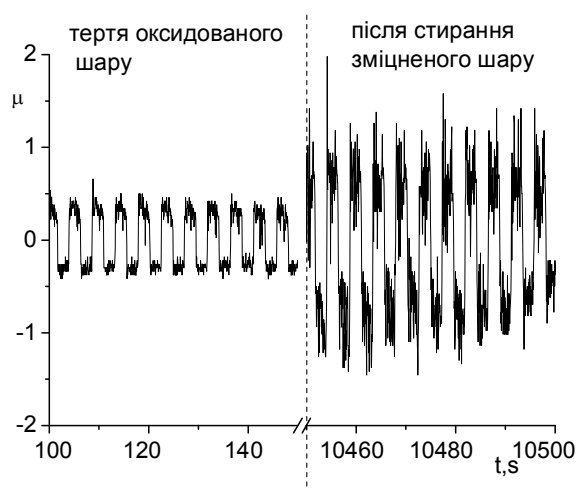


Рис. 8. Осциляції коефіцієнта тертя оксидованого сплаву ВН-10 на початковому етапі і після стирання зміцненого шару

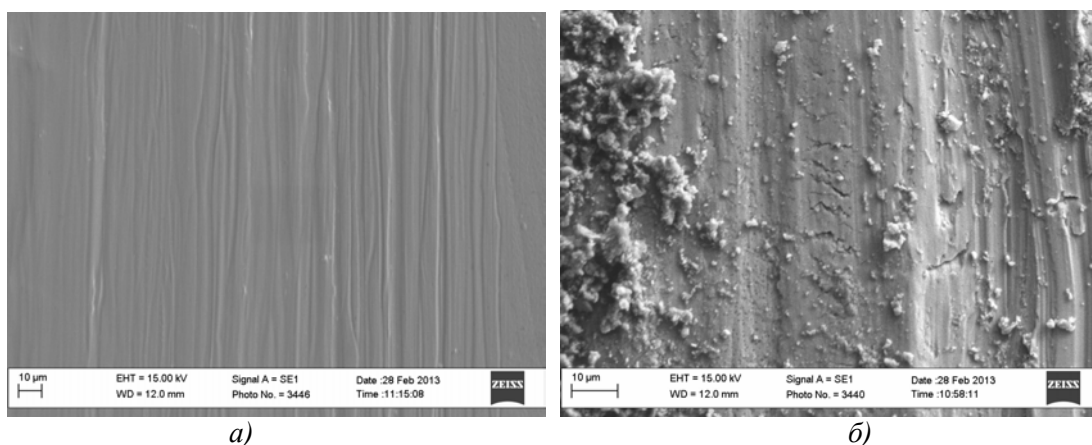


Рис. 9. Поверхня тертя в атмосфері водню окисдованого сплаву ВН-10 (а) і після зношування зміцненого шару (б)

**Висновок.** Виявлено підвищення зносотривкості сплаву ВН-10 після хіміко-термічної обробки окисдуванням за температури 500°C, яка забезпечується формуванням складних оксидів у підповерхневому шарі і корелює з мікротвердістю поверхні, яка зростає на 22...23%.

В умовах тертя без мащення на повітрі коефіцієнт тертя окисдованого сплаву у 5 разів нижчий, ніж вихідного. При електролітичному наводнюванні спостерігається додаткове зміцнення поверхневих шарів розчиненим воднем, що покращує трибологічні властивості сплаву.

При терті в атмосфері водню підвищена зносотривкість спостерігається лише на початковому етапі. За тривалих випроб тертям при пошкодженні твердого оксидного шару і проникненні водню вглиб сплаву спостерігається утворення тріщин і пониження зносотривкості.

1. *Войтович Р.Ф., Головка Э.И.* Высокотемпературное окисление металлов и сплавов. Справочник – Киев: Наук. думка, 1984. – 255 с.
2. *Самсонов Г.В., Борисова А.Л., Жидкова Т.Г. и др.* // Физико-химические свойства оксидов/ Справочник.- М.: Металлургия, 1978. – 472 с.
3. *Троицкий Б.С.* Влияние легирования на жаростойкость сплавов системы Nb-Ti-Al / Троицкий Б.С., Захарова А.М., Карсанов Г.В., Вергасова Л.Л., Власов П.Н. // Физико-химическая механика материалов. – 1981. – №6. – С. 71-74.
4. *Широков В.В.* Закономерности окисдування ніобію з підвищеним вмістом титану/ Широков В.В., Рацька Н.Б. // Фіз. хім. механіка матеріалів. – №4. – 2008. – С.102-108.
5. *Лютій Є.М.* Механізм і закономірності окислення системи Nb-Ti та Nb-Ti-Si / Лютій Є.М., Єлісеєва О.І., Степанишин В.І. і ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1995. – №1. – С.107-115.
6. *Широков В.В.* Вплив домішок титану на структуру та фізико-механічні властивості ніобію. / В.В. Широков, Н.Б. Рацька // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007, №2. – С. 65-70.
7. *Рацька Н.Б.* Підвищення зносотривкості ніобій-титанового сплаву окисдуванням /Рацька Н.Б., Василів Х.Б., Винар В.А.// Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2012 – №4. – С. 117-121
8. *Murakami T.* Friction and wear properties of zirconium and niobium in a hydrogen environment/ Murakami T., Mano H., Kaneda K., Nata M., Sasaki S., Sugimura J.//Wear. – 268. – 2010. – P. 721-729.

Стаття надійшла до редакції 13.05.2013.