

*О. О. АНДРУЩЕНКО, О. І. ПИЛИПЕНКО*

### ЕЛЕКТРОХІМІЧНЕ ФОРМУВАННЯ ТОНКИХ ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНО-ЗАБАРВЛЕНИХ ОКСИДНИХ ПЛІВОК НА СПЛАВІ $Ti_6Al_4V$ В СУЛЬФАТНОМУ ЕЛЕКТРОЛІТІ

**Вступ.** Оксидування титанових імплантатів використовуються для надання поверхні властивостей біологічної сумісності і маркування виробів медичного призначення. Штучно сформовані оксидні плівки мають певну товщину і однорідність хімічного складу. Електрохімічне оксидування дозволяє одержати плівки заданої товщини на виробках будь-якої конфігурації, використовуючи просте обладнання. Властивості оксидних покриттів, а саме – товщина і структура оксидного шару, визначаються типом електроліту оксидування і режимом окиснення сплаву. **Мета роботи** – дослідження впливу режиму процесу на електрохімічне окиснення сплаву  $Ti_6Al_4V$  у сульфатних електролітах. **Матеріали та методи дослідження.** Динаміку формування оксидних плівок у сульфатному електроліті досліджували шляхом аналізу формувальних залежностей  $U = f(\tau)$ , одержаних при окисненні титанового сплаву у гальваностатичному режимі, використовуючи послідовну схему з джерелом живлення Б5-47 та мультиметром Keithley-2000. **Результати.** Характер формувальних залежностей сплаву залежить від густини струму оксидування. За  $j_a < 0,5 \text{ A} \cdot \text{дм}^{-2}$  суцільні оксидні плівки не утворюються і задане значення напруги не досягається. За  $j_a > 0,5 \text{ A} \cdot \text{дм}^{-2}$  на поверхні сплаву утворюються інтерференційно-забарвлені оксидні плівки. Гранична товщина плівки визначається заданою величиною напруги і не залежить від інших параметрів електролізу. Для ряду однакових значень напруги залежності тривалості електролізу від густини струму мають лінійний характер, що свідчить про утворення мало пористих плівок. Колір оксидної плівки визначається значенням напруги і не залежить від густини струму та концентрації сульфатної кислоти у розчині. Аналіз формувальних залежностей дозволив встановити, що при оксидуванні сплаву у сульфатних електролітах формуються малопористі оксидні плівки.

**Ключові слова:** оксидна плівка; формувальна залежність; діоксид титану; електрохімічне окиснення; пасивність.

*А. А. АНДРУЩЕНКО, А. І. ПИЛИПЕНКО*

### ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ТОНКИХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННО-ОКРАШЕННЫХ ОКСИДНЫХ ПЛЕНОК НА СПЛАВЕ $Ti_6Al_4V$ В СУЛЬФАТНОМ ЭЛЕКТРОЛИТЕ

**Введение.** Оксидирование титановых имплантатов используются для придания поверхности свойств биологической совместимости и маркировки изделий медицинского назначения. Искусственно сформированные оксидные пленки имеют определенную толщину и однородность химического состава. Электрохимическое оксидирование позволяет получить пленки заданной толщины на изделиях любой конфигурации, используя простое оборудование. Свойства оксидных покрытий, а именно – толщина и структура оксидного слоя, определяются типом электролита оксидирования и режимом окисления сплава. **Цель работы** – исследование влияния режима процесса на электрохимическое окисление сплава  $Ti_6Al_4V$  в сульфатных электролитах. **Материалы и методы исследования.** Динамику формирования оксидных пленок в сульфатном электролите исследовали путем анализа формовочных зависимостей  $U = f(\tau)$ , полученных при окислении материала в гальваностатическом режиме, используя последовательную схему с источником питания Б5-47 и мультиметром Keithley-2000. **Результаты.** Характер формовочных зависимостей сплава зависит от плотности тока оксидирования. При  $j_a < 0,5 \text{ A} \cdot \text{дм}^{-2}$  сплошные оксидные пленки не образуются и заданное значение напряжения не достигается. При  $j_a > 0,5 \text{ A} \cdot \text{дм}^{-2}$  на поверхности сплава образуются интерференционно-окрашенные оксидные пленки. Предельная толщина пленки определяется заданной величиной напряжения и не зависит от других параметров электролиза. Для ряда одинаковых значений напряжения зависимости длительности электролиза от плотности тока имеют линейный характер, что свидетельствует об образовании малопористых пленок. Цвет оксидной пленки определяется значением напряжения и не зависит от плотности тока и концентрации электролита. Установлено соответствие цвета пленки и величины напряжения в диапазоне ее значений 10-100 В. Анализ формовочных зависимостей позволил установить, что при оксидировании сплава в сульфатных электролитах формируются малопористые оксидные пленки.

**Ключевые слова:** оксидная пленка; формовочная зависимость; диоксид титана; электрохимическое окисление; пассивность.

*О. О. АНДРУЩЕНКО, А. І. ПИЛИПЕНКО*

### ELECTROCHEMICAL FORMATION OF THIN INTERFERENCE-DYED OXIDE FILMS IN $Ti_6Al_4V$ ALLOY IN SULFATE ELECTROLYTES

**Introduction.** Oxidation of titanium implants is used to impart biological compatibility properties to the surface and to mark for medical products. Artificially formed oxide films have a certain thickness and uniformity of chemical composition. Electrochemical oxidation allows to obtain films of a given thickness on products of any configuration, using simple equipment. The properties of oxide coatings, namely, the thickness and structure of the oxide layer, are determined by the type of oxidation electrolyte and the mode of oxidation of the alloy. **The aim of the work** is to study the effect of the process mode on the electrochemical oxidation of the  $Ti_6Al_4V$  alloy in sulphate electrolytes. **Materials and research methods.** The dynamics of the formation of oxide films in a sulfate electrolyte were investigated by analyzing the forming dependences  $U = f(\tau)$  obtained by oxidizing the material in galvanostatic mode using a sequential circuit with a B5-47 power source and a Keithley-2000 multimeter. **Results.** The nature of the molding dependencies of the alloy depends on the density of the oxidation current. At  $j_a < 0.5 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$ , solid oxide films are not formed and the specified voltage value is not reached. At  $j_a > 0.5 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$ , interference-colored oxide films are formed on the alloy surface. The maximum film thickness is determined by a given voltage value and does not depend on other parameters of electrolysis. For a number of identical voltage values, the dependence of the electrolysis duration on the current density is linear, which indicates the formation of low-porous films. The color of the oxide film is determined by the voltage value and does not depend on the current density and electrolyte concentration. The correspondence of the color of the film and the voltage in the range of its values of 10-100 V. The analysis of formation dependences has made it possible to establish that when oxidation of the alloy in sulfate electrolytes, low porous oxide films are formed.

**Keywords:** oxide film; molding dependence; titanium dioxide; electrochemical oxidation; passivity.

**Вступ.** Титан відноситься до активних металів, однак в звичайних умовах його поверхня вкрита суцільною оксидною плівкою. Плівка є захисним бар'єром, який обумовлює пасивність титану в багатьох середовищах [1, 2]. Природні оксидні плівки мають малу товщину ( $5\text{--}6 \cdot 10^{-3}$  мкм), тому для надання поверхні титану певних функціональних властивостей використовують методи одержання штучних покриттів. Штучні плівки характеризуються певною товщиною і структурою. Зокрема, штучні оксидні плівки використовуються як функціональні покриття медичних імплантатів з метою покращення біологічної сумісності і маркування [3, 4]. При оксидуванні відбувається формування високорозвиненої поверхні, що дозволяє поліпшити її контакт з кістковою тканиною [5]. Оксидні плівки на титані отримують декількома методами: термічним і плазмовим окисленням [6, 7], комбінованим методом електрохімічної і гідротермальної обробки [8], дифузійним [9] або електрохімічним окисленням [10-15].

Найбільш поширеним методом оксидування титанових матеріалів є електрохімічне оксидування або анодування. Метод дозволяє отримувати плівки заданої товщини на виробках будь-якої конфігурації при використанні простого обладнання. Використання електрохімічних прийомів дозволяє точно контролювати кількість окисленого металу і дозволяє змінювати властивості покриття в широких межах. Проведення дослідження, спрямованих на встановлення впливу режиму електролізу на властивості оксидних плівок, є актуальним завданням.

**Методика досліджень.** Електрохімічне оксидування проводили, використовуючи зразки сплаву  $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$  у вигляді прямокутних пластин, одержаних з листового прокату. Зразки шліфували пелюстковим кругом на шліфувальному станку, промивали бензином і водопровідною водою. Промиті зразки знежирювали суспензією карбонату натрію, промивали дистильованою водою і хімічно травили у розчині, який містив  $\text{HF}$  і  $\text{HNO}_3$  у об'ємному співвідношенні 1:3.

Після промивки водопровідною і дистильованою водою зразки оксидували у гальваностатичному режимі, використовуючи джерело живлення Б5-47. На джерелі живлення задавали значення напруги у діапазоні 10-100 В з кроком 10 В. Зміну напруги на комірці в процесі оксидування реєстрували мультиметром Keithley-2000.

Електроліз проводили, використовуючи як комірку скляний стакан об'ємом 250 мл, виготовлений з хімічно стійкого скла.

Стакан розміщували у скляному кристалізаторі об'ємом 5 л, заповненому водою, що дозволяло уникнути розігрівання електроліту при оксидуванні. Як допоміжний електрод використовували свинець.

Оксидування проводили у електроліті, який містив  $100 \text{ г} \cdot \text{дм}^{-3}$   $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Розчини електролітів готували на дистильованій воді з реактивів, які відповідали кваліфікації «ч.д.а.».

**Результати досліджень.** Результатом процесу анодування титану у сульфатних електролітах є формування оксидних плівок, які відносяться до інтерференційно-забарвлених [14, 15]. Колір плівки

залежить від її товщини, визначальний вплив на яку має величина кінцевої напруги на комірці  $U$ .

Найбільш інформативним для дослідження процесу анодування є аналіз формувальних залежностей  $U - f(\tau)$ , які дозволяють досліджувати динаміку росту плівки. Характер залежностей визначається анодною густиною струму  $j_a$  (рис. 1).

У діапазоні  $j_a = 0,2\text{--}0,5 \text{ А} \cdot \text{дм}^{-2}$  залежності нелінійні і часто не відтворюються (рис. 1, 1 і 2). За густини струму  $0,2 \text{ А} \cdot \text{дм}^{-2}$  задана величина напруги не досягається. Це пояснюється тим, що утворення оксидного шару складається з двох процесів – електрохімічного формування плівки і її розчинення внаслідок хімічної взаємодії з електролітом.

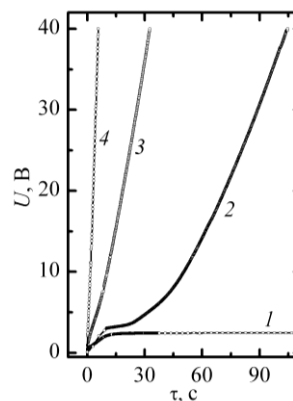


Рисунок 1 – Формувальні залежності, отримані на сплаві  $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$  у розчинах  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .  $c_A = 50 \text{ г} \cdot \text{дм}^{-3}$ .  $j_a, \text{ А} \cdot \text{дм}^{-2}$ : 0,2(1); 0,5(2); 1(3); 5(4)

Перший процес збільшує товщину плівки і відповідно падіння напругу на комірці. Хімічне розчинення зменшує товщину плівки і електричний опір комірки. Горизонтальна ділянка на залежності 1 рис. 1 вказує на стаціонарність процесу, при якому швидкість електрохімічного формування дорівнює швидкості хімічного розчинення плівки. За  $j_a = 0,5 \text{ А} \cdot \text{дм}^{-2}$  (рис. 1, 2) на залежності спостерігається поява плато, після якого відбувається поступове зростання напруги з виходом на задане  $U$ .

Відповідність кольору оксидних плівок, одержаних у сульфатному електроліті, величині кінцевого значення напруги на комірці, наведена у табл. 1.

Таблиця 1 – Відповідність кольору оксидної плівки і значення напруги

$U, \text{ В}$	Колір плівки
10	коричневий
20	синій
30	блакитний
40	світло-зелений
50	жовтий
60	золотавий
70	малиновий
80	темно-бірюзовий
90	світло-бірюзовий
100	зелений

Характерна залежність часу досягнення максимальної для даних умов товщини плівки  $\tau$  від напруги формування зберігається для всього ряду зразків, окисдованих в однакових умовах (рис. 2).

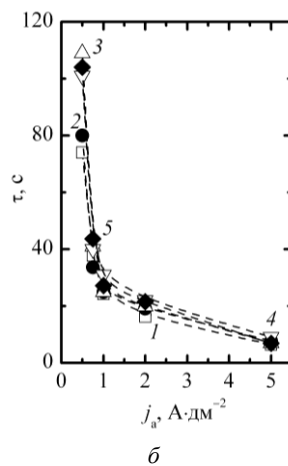
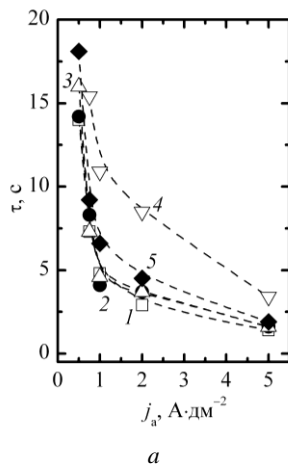


Рисунок 2 – Залежність часу, необхідного для досягнення максимальної товщини плівки, від густини струму при окисдуванні сплаву  $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$  у розчинах  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .  $c_A$ ,  $\text{г}\cdot\text{дм}^{-3}$ : 5(1); 10(2); 25(3); 50(4); 100(5).

Значення кінцевої напруги на комірці, В:  
а – 10; б – 60

Залежності досягнення максимально можливої для даних умов товщини плівки від кінцевої напруги для однакової густини струму і концентрації електроліту мають лінійний характер (рис. 3). Нахил залежностей не залишається постійним, а зменшується при підвищенні густини струму. Зміна концентрації сульфатної кислоти в межах 5-100  $\text{г}\cdot\text{дм}^{-3}$  не впливає на тривалість росту оксидної плівки (рис. 3). Гранична товщина плівки залежить тільки від заданого кінцевого значення  $U$ . При концентрації сульфатної кислоти, більшої за 50  $\text{г}\cdot\text{дм}^{-3}$ , окисдування до напруг, вищих за 70-80 В не виправдане, оскільки призводить до електричного пробоя плівки внаслідок хімічної взаємодії з компонентами електроліту. Пробої оксидної плівки виникають внаслідок наявності у оксидній плівці дефектів [16-17]. Деякі відхилення, помітні на малюнку, викликані похибкою вимірювання часу і відмінністю дійсної площі зразків.

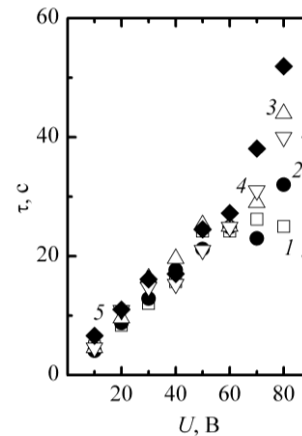


Рисунок 3 – Залежність часу, необхідного для досягнення максимальної товщини плівки від кінцевої напруги на комірці при електрохімічному окисдуванні сплаву  $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$  у розчинах  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .  $j_a = 1 \text{ А}\cdot\text{дм}^{-2}$ .  $c_A$ ,  $\text{г}\cdot\text{дм}^{-3}$ : 5(1); 10(2); 25(3); 50(4); 100(5)

Таким чином, отримані дані показують, що гранична товщина оксидної плівки залежить тільки від заданого значення напруги формування.

Реакція анодного окислення сплаву є складним процесом, однією зі стадій якого є іонізація титану. Якщо плівка складається з  $\text{TiO}_2$ , реакція іонізації титану на межі розділу «метал-оксид» супроводжується утворенням іону  $\text{Ti}^{4+}$ . Вивільнені за цією реакцією електрони надходять у зовнішній ланцюг і формують струм анодування.

Іони  $\text{Ti}^{4+}$  під впливом градієнта електричного поля мігрують через іонну решітку плівки до її зовнішньої поверхні. При анодному окисленні утворений оксид не завжди відповідає стехіометричному складу. Як правило, шар оксиду, звернений до електроліту, містить більше кисню, ніж більш глибокі шари.

Кисень, необхідний для утворення оксидної плівки при анодній поляризації сплаву, надходить з електроліту. Утворення оксидної плівки відбувається в результаті зустрічної міграції іонів титану і кисню. Рушійною силою процесу є наявність значної напруженості електричного поля в плівці при анодному окисленні. Збільшення товщини плівки практично припиняється при досягненні значення градієнта потенціалу, який не може забезпечити переміщення іонів крізь решітку оксиду.

При окисдуванні у гальваностатичному режимі для підтримки заданої густини струму необхідно підтримувати постійну напруженість електричного поля по товщині сформованої плівки. Якщо оксид формується при постійній густині струму, напруга на плівці має лінійно збільшуватися, оскільки напруженість поля  $E$  дорівнює  $E = \frac{V}{\delta}$ ,  $\text{В}\cdot\text{нм}^{-1}$ . Тому товщи-

на оксидної плівки бар'єрного типу визначається рівнянням  $\delta = \alpha V$ , де  $\alpha$  – постійна росту плівки ( $\text{нм}\cdot\text{В}^{-1}$ ). Її значення для титану змінюється в межах 1,9-6,0  $\text{нм}\cdot\text{В}^{-1}$  [18, 19]. На значення  $\alpha$  впливають параметри електролізу, метод вимірювання товщини оксиду, підготовка зразка, фізичні властивості плівки

(густина, кристалічна структура, морфологічні властивості – однорідність поверхні і пористість).

Рушійною силою процес оксидування є наявність значної напруженості електричного поля у плівці при анодному окисненні. Збільшення товщини плівки закінчується при досягненні градієнту потенціалу, який не може забезпечити переміщення іонів крізь решітку оксиду. При окислення титану у гальваностатичному режимі для підтримання заданої густини струму потрібна постійна напруженість поля по товщині сформованої плівки. Якщо оксид утворюється при  $j_a = \text{const}$ , напруга на плівці буде лінійно зростати, тобто буде залежність типу  $x = ay$  в якому  $x$  – товщина плівки,  $y$  – напруга на комірці,  $a$  – коефіцієнт пропорційності, яка буде відповідати постійній росту плівки. Вказана умова спостерігається лише при формуванні малопористих діелектричних плівок в умовах мінімальної хімічної взаємодії з електролітом. В даній дослідній роботі формування малопористих плівок підтверджує лінійний хід залежностей  $U - f(\tau)$ . Лінійність рівняння пояснює незалежність величини граничної товщини плівки від густини струму електролізу і концентрації електроліту.

Вищевикладене пояснює незалежність величини граничної товщини плівки від густини струму електролізу і концентрації електроліту. Дійсно, відповідно до наведених рівнянь товщина оксидної плівки визначається лише кінцевою напругою на комірці. При збільшенні товщини плівки відбувається поступове зниження градієнта падіння потенціалу в оксиді. Зростання плівки припиняється при досягненні критичного значення градієнта потенціалу, який не може забезпечити рух іонів в решітці оксиду. Тому її товщина і колір залежить тільки від значення напруги формування, збільшуючись зі зростанням напруги.

### Висновки.

1. Досліджений процес електрохімічного оксидування титанового сплаву Ti6Al4V у сульфатному електроліті. Показано, що визначальний вплив на залежності  $U - f(\tau)$  має значення анодної густини струму. За густини струму  $j_a < 0,5 \text{ А} \cdot \text{дм}^{-2}$  суцільна оксидна плівка не формується і виходу на задану форму напругу не відбувається. За  $j_a > 0,5 \text{ А} \cdot \text{дм}^{-2}$  спостерігається лінійний характер залежностей  $U - f(\tau)$ , що свідчить про утворення малопористих плівок. Плівки, отримані за густини струму, більших ніж  $0,5 \text{ А} \cdot \text{дм}^{-2}$ , відносяться до інтерференційно-забарвлених. Гранична товщина плівки визначається заданим значенням кінцевої напруги на комірці і не залежить від інших параметрів процесу. Для ряду однакових значень напруги залежності тривалості електролізу від густини струму і концентрації електроліту мають лінійну форму. Зміна густини струму в межах  $0,5\text{-}5,0 \text{ А} \cdot \text{дм}^{-2}$  і концентрації сульфатної кислоти в межах  $5\text{-}100 \text{ г} \cdot \text{дм}^{-3}$  не впливають на тривалість процесу формування плівки максимальної товщини.

2. Встановлено, що при анодній поляризації сплаву Ti6Al4V у розчинах  $\text{H}_2\text{SO}_4$  відбувається окислення сплаву з формуванням на поверхні зразків забарвлених плівок, які за своєю природою відносяться

до інтерференційно-забарвлених оксидних шарів. Колір плівки визначається заданим значенням напруги на комірці і не залежить від концентрації кислоти у розчині і анодної густини струму. У результаті проведених досліджень встановлена відповідність кольору плівки і величини напруги в діапазоні її значень  $10\text{-}100 \text{ В}$ . Одержані результати пояснюються тим, що формування плівки при анодній поляризації відбувається при умовах наявності градієнту потенціалу, величина якого для титану є постійною величиною. Збільшення заданого значення напруги обумовлює пропорційне збільшення тривалості електролізу – збільшує товщину оксидного шару на поверхні сплаву.

### Список літератури

1. Ellerbrock D., Macdonald D. D. Passivity of titanium, part 1: film growth model diagnostics. *J. Solid State Electrochem.* 2014, vol. 18, no. 5, pp. 1485–1493. doi.org/10.1007/s10008-013-2334-6
2. Popa M. V., Vasilescu E., Drob P., Anghel M., Vasilescu C. Mirza-Rosca I., Santana L. A. Anodic passivity of some titanium base alloys in aggressive environments. *Mater. Corros.*, 2002, vol. 53, no. 1, pp. 51–55. doi: 10.1002/1521-4176(200201)53:1<51::aid-maco51>3.0.co;2-6
3. Garg H., Bedi G., Garg, A. Implant surface modifications: a review. *J. Clin. Diagn. Res.* 2012, vol. 6, no. 2, pp. 319–324.
4. Liu X., Chu P., Ding C. Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications. *Mat. Sci. Eng.: R. Reports.* 2004, vol. 47, no. 3–4, pp. 49–121. doi: 10.1016/j.mser.2004.11.001
5. Mandracci P., Mussano F., Rivolo P., Carossa S. Surface treatments and functional coatings for biocompatibility improvement and bacterial adhesion reduction in dental implantology. *Coatings.* 2016, vol. 6, no. 1, pp. 1–22. doi: 10.3390/coatings6010007
6. John A. A., Jaganathan S. K., Supriyanto E., Manikandan A. Surface modification of titanium and its alloys for the enhancement of osseointegration in orthopaedics. *Curr. Sci.* 2006, vol. 111, no. 6, pp. 1003–1015. doi: 10.18520/cs/v111/i6/1003-1015
7. Diefenbeck M., Mückley T., Schrader C., Schmidt J., Zankovych S., Bossert J., Jandt K. D., Faucon M., Finger U. The effect of plasma chemical oxidation of titanium alloy on bone-implant contact in rats. *Biomaterials.* 2011, vol. 32, no. 32, pp. 8041–8047. doi: 10.1016/j.biomaterials.2011.07.046
8. Park E. J., Song Y. H., Hwang M. J., Song H. J., Park Y. J. Surface characterization and osteoconductivity evaluation of micro/nano surface formed on titanium using anodic oxidation combined with  $\text{H}_2\text{O}_2$  etching and hydrothermal treatment. *J. Nanosci. Nanotechnol.* 2015, vol. 15, no. 8, pp. 6133–6136. doi: 10.1166/jnn.2015.10469
9. Lubas M., Sitarz M., Jasinski J. J., Jelen P., Klita L., Podsiad P., Jasinski J. Fabrication and characterization of oxygen-diffused titanium using spectroscopy method. *Spectrochim. Acta A Mol. Biomol. Spectrosc.* 2014, vol. 133, pp. 883–886. doi:10.1016/saa.2014.06.067
10. Sul Y. T., Johansson C. B., Jeong Y., Albrektsson T. The electrochemical oxide growth behaviour on titanium in acid and alkaline electrolytes. *Med. Eng. Phys.* 2001, vol. 23, no. 5, pp. 329–346. doi: 10.1016/s1350-4533(01)00050-9
11. Sul E. T., Byon E., Wennerberg A. Surface characteristics of electrochemically oxidized implants and acid-etched implants: surface chemistry, morphology, pore configurations, oxide thickness, crystal structure, and roughness. *Int. J. Oral Maxillofac. Implants.* 2008, vol. 23, no. 4, pp. 631–640.
12. Fojt J. Ti–6Al–4V alloy surface modification for medical applications // *Appl. Surf. Sci.* 2012. T. 262. C. 63–167. doi: 10.1016/j.apsusc.2012.04.012
13. Veiga C., Davim J. P., Loureiro A. J. R. Properties and applications of titanium alloys: a brief review. *Rev. Adv. Mater. Sci.* 2012, vol. 32, pp. 133–148.
14. Pilipenko A., Pancheva H., Deineka V., Vorozhbiyan R., Chyrkina M. Formation of oxide fuels on VT6 alloy in the conditions of anodic polarization in solutions  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2018, vol. 3, no. 6, pp. 33–38. doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.132521

15. Ivashchenko M., Smirnova O., Kyselova S., Avina S., Sincheshkul A., Pilipenko A. Establishing the patterns in the formation of films on the alloy Ti6Al4V in carbonic acid solutions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018, vol. 5, no. 6, pp. 21–26. doi: 10.15587/1729-4061.2018.143793
16. Pilipenko A., Pancheva H., Reznichenko G., Mirgorod O., Miroshnichenko N., Sincheshkul A. The study of inhibiting structural material corrosion in water recycling systems by sodium hydroxide. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017, vol. 2, no. 1, pp. 21–28. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.95989>
17. Pancheva H., Reznichenko G., Miroshnichenko N., Sincheshkul A., Pilipenko A., Loboichenko V. Study into the influence of concentration of ions of chlorine and temperature of circulated water on the corrosion carbon steel and cast iron. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017, vol. 4, no. 6, pp. 59–64. doi: [doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108908](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108908)
18. Blondeau G., Froelicher M., Froment M., Hugot-Le-Goff A. Structure and growth of anodic oxide films of titanium and TA6V alloy. *J. Less Common Met.* 1977, vol. 56, no. 2, pp. 215–222. doi: 10.1016/0022-5088(77)90043-1
19. Aladjem A. Anodic oxidation of titanium and its alloy. *J. Mater. Sci.* 1973, vol. 8, no. 5, pp. 688–704. doi: 10.1007/bf00561225.

Надійшла (received) 01.02.2019.

### **Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors**

**Андрущенко Олена Олександрівна (Андрущенко Елена Александровна, Andrushhenko Olena)** – магістрант кафедри технічної електрохімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7843-240X>; Тел.: +38(057)707-66-61; e-mail: oandrushhenko@gmail.com

**Пилипенко Олексій Іванович (Пилипенко Алексей Иванович, Piliipenko Alexei)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри технічної електрохімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5004-3680>; Тел.: +38(057)707-66-61; e-mail: opiliipenko1984@gmail.com.