

## КОРОЗИЯ АЛЮМІНІЮ ЗА КОНТАКТУ З ОКСИДОВАНИМИ ТИТАНОМ ТА ЦИРКОНІЄМ

В. В. ШТЕФАН<sup>1</sup>, Б. І. БАЙРАЧНИЙ<sup>1</sup>, Г. В. ЛІСАЧУК<sup>1</sup>, О. Ю. СМІРНОВА<sup>1</sup>,  
В. А. ЗУЙОК<sup>2</sup>, Р. О. РУДЬ<sup>2</sup>, О. В. ВОРОНІНА<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут";

<sup>2</sup> НТК "Ядерний паливний цикл" ННЦ "Харківський фізико-технічний інститут"

Вивчено корозію сплавів на основі титану, алюмінію, цирконію та заліза в розчинах натрій хлориду. Показано, що швидкість корозії алюмінію значно підвищується за контакту з цирконієм, титаном і нержавіючою сталлю. Доведено, що кінетика корозії алюмінію контролюється катодною реакцією відновлення молекулярного кисню. Показано, що швидкість корозії алюмінію поза контактом дорівнює швидкості за контакту з окисдованим цирконієм або титаном. Методом імпедансної спектроскопії досліджено захисні властивості оксидних покривів на титані та цирконії, одержаних мікродуговим оксидуванням та високотемпературним окисненням.

**Ключові слова:** контактна корозія, алюміній, цирконій, титан, сталь.

Резервуари для зберігання води на атомних електростанціях є багатоелектродними системами. Основним конструкційним матеріалом для резервуара є алюмінієвий сплав, наприклад, САВ-1 [1], а його деталі з'єднують за допомогою кріпильних елементів, які виконані зі сплавів заліза, титану й цирконію. Аналіз літературних джерел [2] показав, що існує велика ймовірність виникнення електрохімічної корозії алюмінію і його сплавів, що перебувають у контакті з нержавіючою сталлю, сплавами титану та цирконію. Основні чинники, які впливають на корозійну поведінку алюмінієвих сплавів за їхнього контакту з вищезазначеними матеріалами, такі: хімічний склад охолоджувальної рідини, різниця стаціонарних потенціалів, відношення геометричних поверхонь контактуючих сплавів. Як показано в праці [3], контактна корозія може призвести до істотного погіршення корозійного стану алюмінієвого сплаву та наводнювання титанових і цирконієвих сплавів. Корозія може бути зменшена шляхом усунення контакту між сплавами за допомогою діелектричних прокладок у всіх місцях, де це можливо.

Дослідження контактної корозії у відпрацьованих басейнах для охолодження ядерного палива описані раніше [2, 3]. Корозію спостерігали за контакту алюмінію з нержавіючою сталлю під час регулювання водного режиму. Оглядали після семи років експлуатації та не виявили жодних корозійних виразок, оскільки були використані ізолятори та окисдовані алюмінієві деталі. Таким чином, оксидні покриви на металевих матеріалах можна розглядати як один з можливих засобів захисту від контактної корозії.

Метод мікродугового оксидування дає змогу одержувати оксидні покриви, що мають високу корозійну тривкість і стабільність під час нагрівання на повітрі за температур до 500°C та забезпечують комплексний захист від корозії легуванних сплавів титану і цирконію [4–8]. Високотемпературні реакції взаємодії, що перебігають у каналах електричних пробоїв і прилягаючих до них зонах, є наслідком дії іскрових та дугових електричних розрядів, що обумовлює багатофаз-

ний склад одержаних покривів. Метод мікродугового оксидування в сульфатних електролітах дав можливість одержати оксидні плівки, які складаються з  $TiO_2$  у кристалічних модифікаціях рутил та анатаз.

Мета роботи – пошук шляхів зниження контактної корозії алюмінієвого сплаву САВ-1. Для досягнення цього можна формувати на поверхні цирконієвого сплаву Е110 і титанового сплаву ОТ-4-0 оксидні плівки з високими захисними властивостями.

**Методика експерименту.** Як зразки використовували цирконієвий сплав Е110, сталі марок Х18Н10Т, 12Х1МФ, титановий сплав ОТ-4-0 (домішок не більше, mass.%: Si – 0,12; Al – 0,38), алюмінієвий сплав САВ-1 (домішок не більше, mass.%: Mg – 0,9; Si – 1,2; Ni – 0,03; Ti – 0,01; Fe – 0,05; Cu – 0,01; Zn – 0,03). Зразки мали довжину 35 mm і діаметр 10 mm, відношення площі катода та площі анода 1:1. Перед випробуваннями зразки механічно полірували до зменшення розміру абразивного зерна до 7  $\mu m$ . Для вивчення контактної корозії за кімнатної температури використовували стандартний метод глибокого занурення [9] у комірках об'ємом 250 ml, заповнених дистильованою водою, розчинами натрію хлориду з концентрацією 3 і 6%. Струм контактної корозії контролювали за допомогою амперметра М104, потенціал – вольтметра М1107 та витримували упродовж 8 days. Електрод порівняння – хлоридсрібний електрод ЕВЛ-1М1. Вивчали контактну корозію за температури 50°C у статичних автоклавах (зі скла) у хімічно деіонізованій воді (електропровідність 0,25  $\mu S/cm$ ) і 1%-му розчині NaCl. Всі розчини електролітів готували з реактивів марки “хч”. Зміну маси на одиницю площі розраховували для різних часових відрізків у діапазоні 75...800 h з точністю до 0,01 mg. Досліди повторювали п'ятикратно. Розраховували показники швидкості корозії за такими формулами [10]:

масовий показник корозії,  $g/(m^2 \cdot h)$

$$k_m^{++} = \frac{\Delta m}{S \cdot \tau};$$

глибинний показник корозії, mm/year

$$k_h = \frac{k_m^-}{\rho},$$

де  $\Delta m$  – зміна маси зразка, g;  $S$  – площа поверхні,  $m^2$ ;  $\tau$  – час випробувань, year;  $\rho$  – густина сплаву,  $g/cm^3$ .

Якісну оцінку корозійної тривкості сплавів і оксидних покривів як засобу захисту виконували на підставі десятибальної шкали ДСТУ 5272-50.

Поляризаційні виміри здійснювали на потенціостаті ІРС-Pro у стандартній електрохімічній триелектродній комірці із платиновим допоміжним електродом і хлоридсрібним електродом порівняння, швидкість розгорнення потенціалу 1 mV/s. Попередньо на поверхні зразків електроізоляційним лаком обмежували ділянку площею 0,5  $cm^2$ . Поляризацію починали зі стаціонарного потенціалу, що встановився на зразку через 20 min після занурення в розчин. Розраховували струми контактної корозії за точками перетину анодної поляризаційної кривої для сплаву САВ-1 і катодної частини для сплавів Х18Н10Т, ОТ-4-0, Е110 з різними типами оксидних покривів. Всі значення потенціалів подані відносно н.в.е.

Мікродугові оксидні покриви формували на сплавах ОТ-4-0 та Е110 в електролітах на основі сірчаної кислоти. Формували покриви в гальваностатичному режимі за густини струму 50...200  $A/m^2$ . Докладний опис попередньої підготовки зразків, методики та апаратури мікродугового оксидування поданий раніше [11–15], де були вивчені фазовий та елементний склад оксидів.

На зразках сплаву E110 оксидні плівки формували високотемпературним окисненням у парі води за температури 700°C упродовж 30 min.

Вивчали структуру та корозійну тривкість сформованих оксидних покривів за допомогою імпедансної спектроскопії в розчині 60%-ої сірчаної кислоти. Виміри активного ZRe і ємнісного ZIm елементів імпедансу здійснювали з використанням системи, яка складалася з потенціостата IPC-Pro і аналізатора частотного відгуку FRA у діапазоні частот 0,02...50 kHz за послідовною схемою заміщення. Вимірювали з поляризацією робочого електрода за стаціонарного потенціалу, що встановився упродовж 1 h. Площа поверхні робочого електрода 1 cm<sup>2</sup>, допоміжний електрод – платинова пластина, електрод порівняння – хлоридсрібний. Розраховували параметри імпедансу за методикою [16–18].

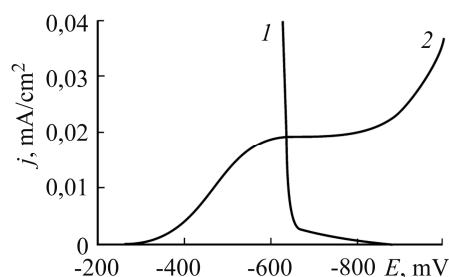
#### Результати та їх обговорення. Контактна корозія за температури 25°C.

На значення потенціалу корозії сплавів великий вплив мають легувальні елементи, обробка поверхні, склад розчину тощо. В розчині 3% NaCl алюмінієвий сплав САВ-1 має найбільший електронегативний потенціал (-750 mV), а потенціали сплавів заліза, цирконію та титану дорівнюють 0, -500, -60 mV відповідно. Отже, у контакті з вищезазначеними сплавами САВ-1 виступатиме анодом гальванічної пари.

Поляризаційні криві для пари САВ-1 і X18Н10Т у 3% розчині NaCl наведені на рис. 1. Характер залежності для сплаву САВ-1 показує, що реакція анодного розчинення алюмінію у хлоридних розчинах відбувається без значної поляризації.

Рис. 1. Поляризаційні залежності сплавів САВ-1 (1) і X18Н10Т (2) в 3%-му розчині NaCl при 25°C.

Fig. 1. Polarization dependences of САВ-1 (1) and X18Н10Т (2) alloys in 3% NaCl solution at 25°C.



Катодний процес реакції відновлення деполіаризатора, у цьому випадку кисню, відбувається з більшою поляризацією та на граничній густині струму. Таким чином, електрохімічна корозія алюмінієвого сплаву в цій парі матиме катодний контроль, тобто вміст кисню та швидкість його дифузії визначає швидкість розчинення анодного матеріалу [1, 8, 10]. Цей висновок підтверджується поляризаційними вимірами, виконаними для цієї пари в розчині 6% NaCl. Густина струму корозії знизилася з 0,018 mA/cm<sup>2</sup> для 3% NaCl до 0,012 mA/cm<sup>2</sup> для 6% NaCl, спричинивши зсув потенціалу корозії у негативний бік на 40 mV, що обумовлено зниженням розчинності кисню зі збільшенням концентрації солі в розчині [10].

На наведених (рис. 2) залежностях контактної густини струму та потенціалів електродів від часу у розчині 3% NaCl видно, що значення величин стабілізуються після 200 h експозиції. Значення електродних потенціалів наближаються і різниця за контакту становить 20 mV, без контакту ~ 750 mV. Введення в середовище агресивного іона-активатора призводить до зниження омичних складових корозійного процесу і, як наслідок, до різкого збільшення швидкості електрохімічної корозії (табл. 1), що узгоджується з теоретичними уявленнями [10]. Результати гравіметричних випробувань показали, що підвищення концентрації хлориду в розчині вдвічі істотно не змінює швидкість корозії САВ-1. Невелике зростання швидкості корозії для нержавіючої сталі викликано ефектом посилення активації локальних анодних ділянок хлорид іонами-активаторами.

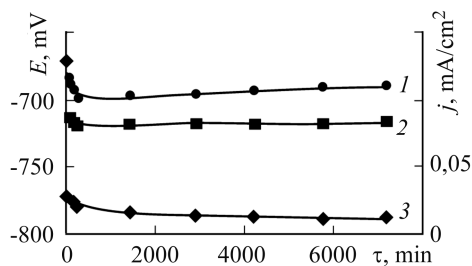


Рис. 2. Залежності потенціалів для пари сплавів X18H10T (1) та CAB-1 (2) і густини струму корозії (3) від часу експозиції в 3%-му розчині NaCl при 25°C.

Fig. 2. Potentials dependences for the alloy couple X18H10T (1), CAB-1 (2) and corrosion current density (3) on exposure time in 3% NaCl solution at 25°C.

**Таблиця 1. Результати гравіметричних випробувань для пари САВ-1 з Х18Н10Т**

Концентрація NaCl, %	Масовий показник корозії сплавів $k_m^-$ , g/(m <sup>2</sup> ·h) / Бал стійкості			
	поза контактом		за контакту	
	САВ-1	X18H10T	САВ-1	X18H10T
0	0,0083 / 4	0,0007 / 1	0,0237 / 5	0,0007 / 1
3	0,0287 / 5	0,0027 / 2	0,1061 / 6	0,0021 / 2
6	0,0485 / 6	0,0050 / 3	0,1108 / 6	0,0073 / 3

Гравіметричними дослідженнями встановлено, що швидкість корозії сплаву САВ-1 за контакту з Е110 і ОТ-4-0 становить 0,0510 і 0,0415 g/(m<sup>2</sup>·h) відповідно для розчину 3% NaCl. Такі результати вказують на сповільнення анодного процесу у гальванопарі порівняно з контактом з Х18Н10Т та виявлені для усіх досліджуваних середовищ (табл. 2). Результати гравіметрії підтверджують хроноамперограми (рис. 3), густина струму контактної пари САВ-1 з Х18Н10Т значно більша, ніж у інших парах. Одержані результати показують, що природні оксидні плівки на сплаві цирконію і титану мають кращі бар'єрні властивості, ніж на нежвавіючій сталі.

**Таблиця 2. Результати гравіметричних випробувань для пари САВ-1 з Е110 і САВ-1 з ОТ-4-0**

Концентрація NaCl, %	Масовий показник корозії сплавів $k_m^-$ , g/(m <sup>2</sup> ·h) / Бал стійкості					
	поза контактом		за контакту			
	Е110	ОТ-4-0	САВ-1	Е110	САВ-1	ОТ-4-0
0	0,0112 / 4	0,0093 / 3	0,0177 / 4	0,0005 / 1	0,0186 / 4	0,0003 / 1
3	0,0185 / 4	0,0147 / 4	0,0510 / 5	0,0037 / 2	0,0415 / 4	0,0010 / 2
6	0,0265 / 5	0,0186 / 4	0,0526 / 5	0,0105 / 4	0,0518 / 5	0,0052 / 3

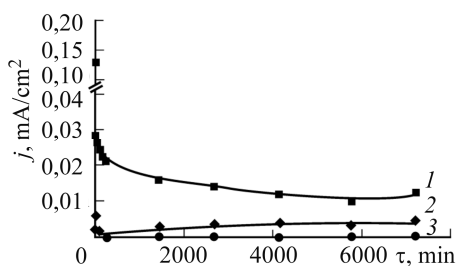


Рис. 3. Залежності контактної густини струму пар сплавів САВ-1 з Х18Н10Т (1), Е110 (2) та окисдованими Е110<sub>ox</sub> і ОТ-4-0<sub>ox</sub> (3) від часу експозиції в 3%-му розчині NaCl при 25°C.

Fig. 3. Contact current density dependences of the alloy couple CAB-1 and X18H10T (1), E110 (2) and oxidized E110<sub>ox</sub> and OT-4-0<sub>ox</sub> (3) on exposure time in 3% NaCl solution at 25°C.

**Контактна корозія за температури 50°C.** Корозійну поведінку сплавів за підвищеної температури продемонстровано на рис. 4. Збільшення температури середовища призводить до зміни природи головного деполяризатора. Як відомо, зі зростанням температури водних розчинів концентрація розчиненого молекулярного кисню знижується [1, 10], отже, корозійний процес буде перебігати з водневою деполяризацією, у якому катодною реакцією є відновлення молекул води. Тому кінетичні залежності для металевих матеріалів у підігрітих розчинах будуть істотно відрізнятися від залежностей, одержаних за кімнатної температури. Результати експерименту цілком очікувані та відповідають сучасним уявленням про кінетику корозії цих матеріалів. Як видно із залежностей (рис. 4), найбільшу швидкість корозії демонструє САВ-1, хоча за тривалості експерименту більше 200 h швидкість корозії залишається практично сталою. Сплави цирконію, заліза і титану демонструють низьку швидкість розчинення і за контакту з алюмінієм, згідно з гравіметричними результатами, швидкість корозії цих сплавів суттєво не змінюється. Приріст ваги продуктів корозії для САВ-1 за контакту в цих умовах значно знизився, що пов'язано з пришвидшенням анодної реакції, розчинення металу, тобто виходом катіонів алюмінію в навколишнє середовище. У результаті катіони вступають у реакцію гідролізу і, як наслідок, відбувається зниження рН приелектродного шару. За досягнення рН < 4, відповідно до діаграми Пурбе, значна частина оксиду алюмінію розчиняється, і катіони  $Al(OH)^{2+}$  дифундують у розчин. В об'ємі нейтрального розчину гідроліз завершується випаданням осаду.

Для встановлення властивостей оксидних плівок зразки впродовж 140 h витримували в хімічно демінералізованій воді, а потім у розчині 1% NaCl (рис. 5). Як видно із залежностей, поведінка сплаву алюмінію поза контактом суттєво не змінюється, а швидкість приросту ваги продуктів корозії трохи знижується, що є наслідком дії хлорид-іонів. Поведінка САВ-1, що знаходиться у контакті з нержавіючою сталлю різко змінюється зі зміною складу розчину. Це явище підтверджує вищенаведені висновки. Зміна розчину призводить до різкого падіння омичних ускладнень перебігу корозії. Тому швидкість анодної реакції розчинення алюмінію різко зростає, що призводить до різкого падіння рН і, як наслідок, руйнування оксидної плівки. Як видно із графіка, за 100 h експозиції значна частина продуктів корозії перейшла в розчин.

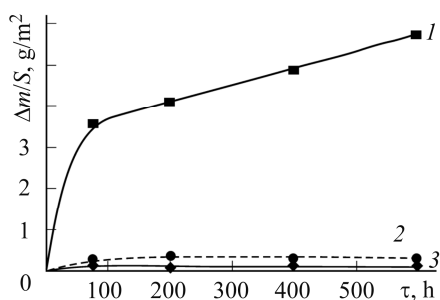


Рис. 4. Fig. 4.

Рис. 4. Залежності швидкості корозії сплавів САВ-1 (1), Е110 (2) і ОТ-4-0 (3) від часу експозиції в дистильованій воді при 50°C.

Fig. 4. Dependences of corrosion rate of alloys CAB-1 (1), E110 (2), OT-4-0 (3) on exposure time in distilled water at 50°C.

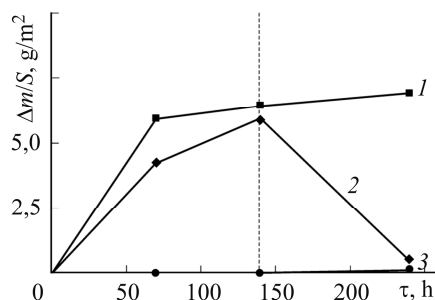


Рис. 5. Fig. 5.

Рис. 5. Залежності швидкості корозії сплавів поза контактом САВ-1 (1) і за контакту САВ-1 (2) з Х18Н10Т (3) від часу експозиції в дистильованій воді і 1% NaCl при 50°C.

Fig. 5. Corrosion rate dependences of alloys outside contact CAB-1 (1) and in contact CAB-1 (2) with X18H10T (3) on exposure time in distilled water and 1% NaCl at 50°C.

Аналогічні кореляції одержані для пар САВ-1 з ОТ-4-0 і САВ-1 з Е110, однак сплави на основі d<sup>2</sup>-металів виявили вищу корозійну тривкість і швидкість корозії САВ-1 при цьому нижча порівняно зі швидкістю корозії цього сплаву за контакту з Х18Н10Т.

**Захист від контактної корозії.** Результати попередньої оцінки протикорозійних властивостей оксидних покривів, виконаної методом імпедансної спектроскопії, подані в табл. 3. Оксиди на поверхні сплавів призводять до різкого збільшення опору [5, 9], отже одержані покриви демонструють високі діелектричні властивості. Це відкриває можливість для усунення контактної корозії між САВ-1 і сплавами титану та цирконію. Однак для сплаву Е110 високотемпературне оксидування дозволяє одержувати покриви з вищим значенням повного імпедансу, що, ймовірно, пов'язано з утворенням оксидів досконалішої структури. Тому для подальших випробувань

**Таблиця 3. Значення повного імпедансу |Z|, кΩ**

Метод оксидування	Сплав	Частота, Hz	
		1000	10 000
Неоксидований	Е110	8,49	2,86
	ОТ-4-0	4,07	1,45
Високотемпературне	Е110	92,73	19,10
Мікродугове	Е110	15,64	3,36
	ОТ-4-0	10,48	2,44

застосовували зразки сплаву Е110, оксидовані високотемпературним методом.

Випробування контактної корозії САВ-1 із оксидованими зразками показали різке зниження струму (див. рис. 3), а показник корозії в 3% NaCl за температури 25°C впав до значень 0,0307 g/(m<sup>2</sup>·h) в парі з Е110<sub>ок</sub> і 0,0295 g/(m<sup>2</sup>·h) в парі з ОТ-4-0<sub>ок</sub>. Одержані результати порівняні з такими для сплаву алюмінію поза контактом (див. табл. 1).

Результати корозійних випробувань, одержані за температури 50°C для САВ-1 у парі з Е110<sub>ок</sub> і ОТ-4-0<sub>ок</sub>, практично повністю збігаються з результатами, одержаними поза контактом. Згідно з гравіметричними результатами, за експозиції впродовж 600 h швидкості корозії сплаву алюмінію як поза контактом, так і у контакті однакові, а кінетика окиснення САВ-1 не змінюється. Зовнішній вигляд зразків демонструє відсутність локальних корозійних осередків.

### ВИСНОВКИ

На підставі експериментальних результатів встановлено, що створення на поверхні сплавів титану та цирконію оксидних шарів із використанням хімічних або електрохімічних методів сприяє мінімізації або відсутності контактної корозії алюмінієвого сплаву протягом довгого терміну служби у реакторах та сховищах відпрацьованого палива. Попереднє окиснення сплавів дає змогу підтримувати їх у пасивному стані, коли є відхилення параметрів якості води (концентрацій кисню, хлоридів та сульфатів) від рекомендованих меж у системах охолодження.

**РЕЗЮМЕ.** Изучена коррозия сплавов на основе титана, алюминия, циркония и железа в растворах натрий хлорида. Показано, что скорость коррозии алюминия значительно повышается в контакте с цирконием, титаном и нержавеющей сталью. Доказано, что кинетика коррозии алюминия контролируется катодной реакцией восстановления молекулярного кислорода. Показано, что скорость коррозии алюминия вне контакта равна величине в контакте с оксидированным цирконием или титаном. Методом импедансной спектроскопии исследованы защитные свойства оксидных покрытий на титане и цирконии, полученных микродуговым оксидированием и высокотемпературным окислением.

**SUMMARY.** The corrosion of alloys based on titanium, aluminum, zirconium and iron in sodium chloride solutions it is studied. The corrosion rate of aluminum significantly increases in contact with zirconium, titanium and stainless steel. It is proved that the kinetics of aluminium

corrosion is controlled by the cathode reaction of reduction of molecular oxygen. It is shown that the corrosion rate of aluminum out of contact is equal in contact with oxidized zirconium or titanium. Protective properties of oxide coatings on titanium and zirconium obtained by the method of microarc oxidation and high-temperature oxidation are investigated by the method of electrochemical impedance spectroscopy.

1. Герасимов В. В. Коррозия реакторных материалов – М.: Атомиздат, 1980. – 256 с.
2. Коррозионная стойкость алюминиевого сплава САВ-1 после эксплуатации в активной зоне реактора ВВР-К и хранения в водном бассейне / О. П. Максимкин, А. В. Яровчук, Д. С. Аулова, Л. Г. Турубарова, С. В. Карбышева // Вопросы атомной науки и техники. – 2010. – Серия 96, № 5. – С. 78–83.
3. Влияние нейтронного облучения на межкристаллитную коррозию и коррозионное растрескивание низколегированного алюминиевого сплава САВ-1 / О. П. Максимкин, А. В. Яровчук, Л. Г. Турубарова, Д. С. Аулова, С. В. Карбышева, А. В. Русакова // Вопросы атомной науки и техники. – 2011. – Серия 97, № 2. – С. 108–115.
4. Аверьянов Е. Е. Справочник по анодированию. – М.: Машиностроение, 1988. – 224 с.
5. Корозійна поведінка феросплавних та оксидних матеріалів на основі титану / В. Штефан, Б. Байрачний, А. Тульська, О. Смирнова // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – Спец. вип. № 10. – Т. 1. – С. 84–88.
6. Штефан В. В., Шевякин С. В., Смирнова А. Ю. Коррозионное поведение оксидированного сплава титана ОТ // Всероссийская конф. “Современные проблемы коррозионно-электрохимической науки” (18–22 октября 2010 г.): сб. докл. и тез. – М., 2010. – Т. 1. – С. 349.
7. Смирнова А. Ю., Штефан В. В. Коррозионная стойкость МДО-покрытий на титане сформированных в W-, Mo-, V-, Se-содержащих растворах // Тез. докл. Междунар. конф. “Противокоррозионная защита – ключ к энергетической и экологической безопасности” (3–5 декабря 2013 г.). – Москва, Россия, 2013. – С. 114.
8. The corrosion behavior of the alloy based on Ti, Zr, Al and Fe / A. Herman, V. Shtefan, A. Smyrnova, V. Zuyok, R. Rud // 10<sup>th</sup> Int. Conf. on Physics of Advanced Materials (22–28 September 2014): book of abstracts. – Iasi, Romania, 2014. – P. 141.
9. Смирнова А. Ю., Штефан В. В. Коррозионная стойкость МДО-покрытий на титане, сформированных в W-, Mo-, V-, Se-содержащих электролитах // Коррозия: материалы, защита. – 2014. – № 8. – С. 14–19.
10. Жук Н. П. Курс теории коррозии и защиты металлов. – М.: Metallurgy, 1976. – 472 с.
11. Штефан В. В., Смирнова А. Ю. Электрохимическое формирование церийсодержащих оксидных покрытий на титане // Ж. прикладной химии. – 2013. – Т. 86, Вып.12. – С. 1894–1899.
12. Патент 107117 Україна, МПК (2006.01), C25D 11/00, C25D 3/54. Спосіб формування оксидних покриттів на титанових сплавах / В. В.Штефан, О. Ю. Смирнова, Г. В. Стеценко. – Опубл. 25.11.2014; Бюл. № 22.
13. Патент 87365 Україна, МПК (2014.01) C24D 11/00. Спосіб формування каталітично-активного покриття на титанових сплавах / В. В. Штефан, О. Ю. Смирнова, В. Ю. Коваленко, Г. В. Стеценко. – Опубл. 10.02.2014; Бюл. № 3.
14. Штефан В. В., Смирнова А. Ю. О строении церийсодержащих оксидных покрытий на титане // Вопросы химии и химической технологии УГХТУ. – 2013. – № 4. – С. 195–197.
15. Смирнова А. Ю., Штефан В. В. Структурно-фазовый состав оксидных покрытий на титане // Тезисы докл. VI междунар. конф. “Современные методы в теоретической и экспериментальной электрохимии” (8–12 сентября 2014 г.). – Плес, Ивановская область, Россия, 2014. – С. 169.
16. Электрохимический импеданс / З. Б. Стойнов, Б. М. Графов, Б. Савова-Стойнова, В. В. Елкин. – М.: Наука, 1991. – 336 с.
17. Кузнецов О. Импеданс моделей корозії металу з гомогенною і гетерогенною поверхнею // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – Спец. вип. № 4. – С. 35–40.
18. Будников Г. К., Майстренко В. Н., Вяселев М. Р. Основы современного электрохимического анализа. – М.: Мир, 2003. – 592 с.

Одержано 26.05.2015