

УДК 621.357.77

DOI: 10.31471/2304-7399-2020-1(59)-165-178

## ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ПЛАЗМОЕЛЕКТРОЛІТИЧНОГО ОКСИДУВАННЯ АЛЮМІНІЮ НА ШВИДКІСТЬ РОСТУ ПОКРИТТІВ

**В. М. Посувайло<sup>1</sup>, В. С. Витвицький<sup>2</sup>, М. М. Романів<sup>2</sup>,  
Т. О. Пригоровська<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України;  
м. Львів, вул. Наукова, 5, 79060; e-mail: posuvaylo@ipm.lviv.ua;

<sup>2</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;  
м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, 76019; тел. +380(342)54-72-66

*Проведено аналіз методів підвищення продуктивності формування оксидних покриттів під час плазмоелектролітичного оксидування алюмінію в електроліті. Розроблено технологічний процес виготовлення заготовок та зміцнення деталей плазмоелектролітичним оксидуванням в електроліті, а також модернізовано установку. Досліджено процес синтезу оксидокерамічних покриттів на алюмінієвому деформованому сплаві ДІБТ під час плазмоелектролітичного оксидування в електроліті за різних значень параметрів технологічного процесу. Встановлено, що швидкість росту оксидокерамічного покриття можна істотно підвищити шляхом збільшення концентрації компонентів електроліту, які беруть участь у процесі окислення алюмінію та раціональним вибором електричних параметрів процесу. Додавання пероксиду водню призводить до збільшення товщини отриманих оксидокерамічних покриттів внаслідок росту концентрації  $O$ ,  $O_2$ ,  $OH$ ,  $OH^-$  в електроліті. Встановлено, що оптимальна концентрація  $H_2O_2$  становить від 5 г/л до 7 г/л. Подальше підвищення концентрації пероксиду в електроліті призводить до зменшення впливу пероксиду на швидкість росту оксидокерамічних покриттів на алюмінієвому деформованому сплаві ДІБТ внаслідок зміни рН електроліту та погіршення властивостей оксидного покриття.*

**Ключові слова:** алюмінієві сплави, технологічний процес, плазмоелектролітичне оксидування, електроліт, пероксид водню, співвідношення густин катодного та анодного струмів, оксидокерамічне покриття, товщина покриття.

**Вступ.** Обсяги використання алюмінієвих, магнієвих та титанових сплавів у промисловості постійно зростають. На даний час у світі широко проводяться наукові дослідження спрямовані на розширення областей використання титанових та алюмінієвих сплавів у таких галузях промисловості як хімічне машинобудування, авіабудування автомобілебудуван-

ня та інших галузях промисловості, оскільки вказані матеріали забезпечують високу питому міцність конструкції, поглинають енергію удару, добре обробляються різанням і пластичним деформуванням. Легкі сплави дозволяють суттєво зменшити масу конструкцій, але мають низьку зносо- та корозійну стійкість і потребують додаткової поверхневої обробки. У зв'язку з ростом жорсткості умов експлуатації – силового та контактного навантаження, агресивності застосовуваних технологічних середовищ стає актуальним підвищення фізико-механічних та корозійних властивостей поверхневих шарів конструкційних матеріалів, які використовують для виготовлення деталей, особливо нафтогазового обладнання.

Поряд із такими перевагами, зазначені легкі сплави володіють достатньо високою корозійною стійкістю, але мають низьку зносостійкість, що стримує їх широке застосування для виготовлення відповідальних деталей. Тому одним з найактуальніших завдань сучасної науки і техніки є розробка нових екологічно чистих технологій нанесення високоефективних і надійних покриттів для захисту та зміцнення робочих поверхонь алюмінієвих деталей машин і механізмів.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Для підвищення зносостійкості, корозійної стійкості та довговічності деталей машин використовують конструкторські, технологічні та експлуатаційні методи.

За рахунок раціонального вибору конструкції протекторного потовщення та матеріалу забезпечується підвищення несучої здатності алюмінієвих бурильних труб під час буріння свердловин, які працюють у середовищі бурового розчину [1]. Для контролю стану втоми нарізей бурильної колони труб використовують індикатори, які встановлюють у замкове з'єднання [2]. Для удосконалення конструкції бурового амортизатора застосовують циліндричні оболонки з розрізом [3]. Під час конструювання деталей та вузлів різного призначення застосовують силове та температурне моделювання взаємодії елементів [4–6], а також корозійні дослідження [7].

Серед експлуатаційних методів на особливу увагу заслуговують бурові амортизатори [8], які служать для захисту таких споруд, як повітряні лінії електропередачі, димоходи, висотні будівлі від надмірних динамічних впливів, що можуть призводити до їх пошкодження або руйнування, а також методи ліквідації прихоплень бурової колони [9–11].

Технологічні методи дозволяють підвищити довговічність виробів за рахунок підвищення точності виготовлення їх деталей [12, 13], а також застосування різноманітних методів зміцнення як на стадії отримання заготовок [14, 15], так і на завершальних операціях шляхом нанесення різноманітних покриттів [16–19].

Відомо багато способів поверхневого зміцнення легких сплавів відповідно: азотування [20], хромування [21, 22] та нанесення композиційних покриттів [22, 23], анодування [24, 25] тощо. Як електроліт під час

анодування алюмінію та його сплавів використовують сірчану кислоту, хромову кислоту тощо [24, 25]. Слід зазначити, що електроліт – хромово кислота містить шестивалентний хром (Cr (VI)), сполуку, відому своєю токсичністю та канцерогенними властивостями. Щоб відповідати новим суворим міжнародним правилам, щодо Cr (VI) ера його застосування незабаром повинна закінчитися. Тому широко ведуться роботи спрямовані на розробку екологічно чистих електролітів для анодування [25].

Всі ці способи підвищують корозійну стійкість, але зносостійкість отриманих оксидних покриттів на алюмінієвих сплавах є недостатньо високою. Тому для підвищення зносо- та корозивної тривкості алюмінієвих сплавів застосовують плазмоелектролітичне оксидування в електроліті [26–31], або інша назва процесу – мікродугове оксидування поверхонь деталей машин та обладнання, яке забезпечує формування оксидних покриттів. Плазмоелектролітичне оксидування знайшло використання для зміцнення титану [32] та магнію [33]. В дослідженнях [34, 35] запропоновано здійснювати плазмоелектролітичне оксидування алюмінієвих покриттів попередньо нанесених на поверхню сталі.

Зараз активно розвивається порівняно новий вид поверхневої обробки та зміцнення металевих матеріалів, який бере свій початок від традиційного анодування – плазмоелектролітне оксидування. Воно дає змогу отримувати багатофункціональні оксидокерамічні покриття з унікальним комплексом властивостей на вентильних металах (Al, Mg, Ti, Zr, Ta). Зразки з вентильних металів занурюють в електроліт і до них почергово прикладають анодну та катодну напругу. Проаналізувавши результати досліджень [26–31], можна зробити висновок, що виділяють чотири основні етапи формування оксидокерамічних покриттів на вентильних металах: утворення на доіскровій стадії первинної оксидної плівки за електрохімічним механізмом; пробій первинної оксидної плівки і поява плазмового згустку в розрядному каналі; газофазні хімічні реакції утворення проміжних і кінцевого продукту; конденсація та поліморфні перетворення оксидних фаз. Покриви сформовані під час плазмоелектролітичного оксидування в основному складаються із високотемпературних оксидних фаз ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ). Зокрема на алюмінієвих сплавах утворюються покриви, у складі яких є високотемпературна тверда фаза  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  зі структурою корунду, який утворюється за високих температур, має високу мікротвердість (20 GPa) та зносотривкість. Покриви мають добрі зносо-, корозійно-, теплотривкі та електроізоляційні властивості.

До основних переваг плазмоелектролітичного оксидування можна віднести: відносно не високу вартість хімічних реактивів, одержання необхідної товщини покриття, структури та шорсткості, технологічний процес не вимагає високої точності для монтажу та демонтажу обладнання, простота конструкції обладнання та екологічність процесу. Спосіб плазмоелектролітичного оксидування полягає у модифікуванні поверхне-

вих шарів алюмінієвих сплавів шляхом впливу на них висококонцентрованими потоками енергії. А саме – висока напруга прикладається між алюмінієвою деталлю, що розміщена в електроліті, та електродом із нержавіючої сталі (зазвичай гальванічна ванна). При цьому на поверхні деталі спочатку виникають мігруючі точкові іскрові, а потім – мікродугові розряди, що чинять термічний, плазмохімічний та гідродинамічний вплив на поверхневий шар алюмінієвої деталі переробляючи його в керамічне оксидне покриття, що міцно зчеплене з металевою основою.

Тому одним з найактуальніших завдань сучасної науки і техніки є розробка нових екологічно чистих технологій нанесення високоефективних і надійних покриттів для захисту і зміцнення робочих поверхонь металевих виробів. Спосіб зміцнення плазмоелектролітичним оксидуванням алюмінієвих сплавів постійно удосконалюється, проте постає потреба у підвищенні інтенсивності процесів плазмоелектролітичного оксидування та підвищенні продуктивності формування оксидних покриттів на поверхні алюмінієвих деталей машин оскільки тривалість формування оксидного покриття зазвичай становить біля 6 год, а на поверхні покриття формується шорстка поверхня.

Для підвищення ефективності процесу плазмоелектролітичного оксидування застосовують моделювання, діагностику та управління [36], високі густини струму [37], а також формують оксидні покриття із суспензій [38, 39]. У праці [40] проведено критичний аналіз способу плазмоелектролітичного оксидування.

В роботі [41] розроблено спосіб, при якому формують на поверхні заготовки деталі шар із алюмінію або алюмінієвого сплаву, що піддається анодуванню, та в подальшому здійснюють його плазмоелектролітичне оксидування. При цьому після завершення формування оксидного шару проводять механічну обробку, однак механічна обробка одержаного керамічного шару через його високу твердість вимагає великих затрат часу, електроенергії та алмазного інструменту.

Авторами [42] для підвищення економічності процесу оксидування розроблено новий спосіб формування оксидних покриттів. Обробку деталі ведуть на першій стадії в розчині алюмінату або силікату лужного металу з кремнійфтористим натрієм (служить каталізатором процесу) в мікродуговому режимі, а на другій стадії – в слаболужному розчині алюмінату або силікату лужного металу. В результаті на першій стадії процесу формують технологічний шар, що сприяє появі під ним основного високотвердого полікристалічного шару оксидного покриття. Загальний час формування покриття менший в 1,5 – 2,5 рази, ніж при традиційному способі. Витрата електроенергії менша 4 – 5 кВт·год/дм<sup>2</sup>. Однак істотний недолік цього способу полягає в тому, що поверхня оброблюваних деталей виходила дуже грубою, що обмежує його області застосування.

Винахідники [43] розробили процес мікродугового оксидування деталей із алюмінію та його сплавів, який проводять у дві стадії. На пе-

ршій стадії розчин алюмінату або силікату лужного металу концентрацією від 20 г/л до 150 г/л з'єднують з кремнійфтористим натрієм концентрацією 2 г/л до 20 г/л і витримують в ньому деталь протягом 20 – 40 хв, а на другій стадії – деталь поміщають у лужний розчин силікату або алюмінату з концентрацією від 2 г/л до 10 г/л із концентрацією лугу 0,5 г/л до 4 г/л і витримують у ньому 1,5 – 2 год. Потім зміцнювану деталь поміщають в 50 % – 65 % розчин плавикової кислоти за температури 30 С – 60 С на 5 – 30 хвилин для часткового руйнування і зменшення міцності зовнішнього пористого технологічного шару. Після цього вкриту деталь промивають у протічній воді і піддають механічній обробці. Застосування плавикової кислоти, яка має властивість руйнувати силікати, з яких переважно складається верхній технологічний шар, одержаний на першій стадії мікродугового оксидування. Пористість технологічного шару сприяє глибокому проникненню плавикової кислоти по всій його товщині. За витримки: температура близько 30°С, концентрація плавикової кислоти менше 50 %, час витримки менше 5 хвилин зменшується міцність тільки зовнішньої частини верхнього технологічного шару. Цим досягається: зниження енергоємності, матеріалоємності та зменшення часу подальшої механічної обробки шліфуванням. При підвищенні температури понад 60 С та концентрації плавикової кислоти, і часу витримки більше 30 хвилин плавикова кислота проникає в пори основного високотвердого полікристалічного шару оксидного покриття, і по них досягає матеріалу алюмінієвої основи, що може спричинити відшаровування оксидного покриття та його розтріскування під час подальшої механічної обробки, що в кінцевому підсумку призводить до руйнування керамічного шару покриття та браку виробництва.

У [44] вивчили характеристики утвореного оксидного покриття на алюмінієвому сплаві А17075 з використанням плазмоелектролітичного оксидування у розплавленій солі та дослідили вплив частоти струму на структуру та властивості сформованих оксидних покриттів.

Результати проведеного літературного огляду дозволили встановити, що найбільш дієвими та перспективними серед вищевикладених чинників для підвищення ефективності процесу плазмоелектролітичного оксидування є такі: матеріал заготовки деталі, хімічний склад електроліту та струмові режими.

У зв'язку з цим виникає необхідність проведення досліджень впливу технологічних параметрів процесу плазмоелектролітичного оксидування: складу електроліту (силікатно-лужного); струмових параметрів на ефективність технологічного процесу зміцнення алюмінієвого деформованого сплаву, що володіє високими показниками питомої міцності.

**Мета дослідження.** Метою роботи є розроблення технологічних шляхів підвищення продуктивності процесу плазмоелектролітичного оксидування алюмінієвого деформованого сплаву, а саме дослідження процесу синтезу оксидокерамічних покриттів та розробка складу елект-

ролітів і технологічних режимів, які дозволять підвищити швидкість росту оксидного покриття на алюмінієвому деформованому сплаві та відповідно зменшити енергоємність процесу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз реакцій, що протікають у розрядних каналах під час плазмоелектролітичного оксидуванням алюмінію в електроліті та запропонувати науково обґрунтовані шляхи підвищення ефективності технологічного процесу оксидування алюмінію;

- дослідити процес синтезу оксидокерамічних покриттів на алюмінії та розробити склад електроліту і технологічні режими синтезу, які дозволять підвищити швидкість росту оксидного покриття та відповідно зменшити енергоємність процесу плазмоелектролітичного оксидуванням алюмінію.

**Матеріали та методи дослідження.** Для формування оксидних покриттів розроблено технологічний процес виготовлення заготовок та зміцнення алюмінієвих деталей плазмоелектролітичним оксидуванням в електроліті, який включає такі основні операції:

- отримання заготовки;
- механічна обробка заготовки;
- підготовка поверхні заготовки (знежирювання);
- монтування заготовки на підвісці та занурення в електроліт;
- формування оксидного покриття;
- промивання деталі з оксидним покриттям;
- сушіння деталі;
- контроль розмірів деталі, товщини та шорсткості поверхні оксидного покриття.

Модернізована установка для плазмоелектролітичного оксидування алюмінієвих деталей в електроліті містить такі основні вузли та системи:

- гальванічну ванну;
- підвіску для деталей;
- систему живлення електричним струмом (змінним або постійним);
- систему автоматизованого керування процесом оксидування;
- систему перемішування електроліту;
- систему охолодження електроліту;
- систему витяжної вентиляції;
- систему блокування;
- систему звукової сигналізації.

Оксидокерамічні покриття синтезували на алюмінієвому деформованому сплаві Д16Т (масові %): Al – 94,7 %, Cu – 3,8–4,9 %, Mg – 1,2–1,8 %, Mn – 0,3–0,9 %. Розмір плоских зразків 20x15x3 мм. Перед плазмоелектролітичним оксидуванням зразки шліфували та полірували, промивали у дистильованій воді та знежирювали в етиловому спирті. Покриття формували способом плазмоелектролітичного оксидування шля-

хом почергового прикладання анодних та катодних імпульсів струму до зразка зануреного в електроліт. Густина анодного струму становила  $J_a = 10 \text{ A/dm}^2$ , густина катодного  $J_c = 10 \text{ A/dm}^2$ ; та відповідно  $J_a = 15 \text{ A/dm}^2$  і  $J_c = 10 \text{ A/dm}^2$ . Електролітом слугував водний розчин КОН – 1,5 g/l та рідкого скла (р.с.) – 2 g/l. Для проведення експериментів готували різні водні електроліти шляхом додавання перекису водню  $\text{H}_2\text{O}_2$  відповідно таких концентрацій: 3 g/l, 5 g/l, 7 g/l) та 10 g/l.

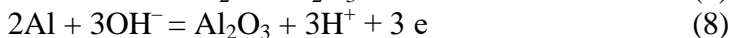
Товщину оксидних покриттів, сформованих на алюмінієвому сплаві Д16Т, визначали за допомогою товщиноміра СНУ ТG-05. Точність вимірювань товщин оксидних покриттів у діапазоні від 0 мкм до 199 мкм становила  $\pm 10\%$ .

**Результати дослідження та їх обговорення.** Під час плазмоелектролітичного оксидуванням алюмінію в електроліті в розрядних каналах відбувається дисоціація та термічний розклад води за реакціями:



Ці реакції досить енергозатратні та дають основний внесок:  $\text{O}_2$ ,  $\text{O}$ ,  $\text{OH}^-$  та  $\text{OH}$  при взаємодії яких з металом основи (алюмінієм) і формується оксидне покриття. У роботі [45] встановлено, що кількість кисню в розрядних каналах є невисока. Хоча у внутрішніх ділянках покриття спостерігається збільшений вміст алюмінію. Отже недоліком процесу плазмоелектролітичного оксидування є досить висока кількість електроенергії, що йде на отримання покриттів у традиційних електролітах, тому необхідно розробляти і досліджувати нові складки електролітів.

Утворення оксиду алюмінію у каналах плазмових розрядів описують формулами:



Виходячи із закону діючих мас збільшити вихід оксиду алюмінію за реакціями (5) – (8) можна шляхом підвищення концентрації складових реагентів, зокрема  $\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{OH}^-$ . Збільшити її можна, наприклад введенням у склад електроліту пероксиду водню  $\text{H}_2\text{O}_2$ , який є нестійкою сполукою і може розпадатися за реакціями:



Для збільшення швидкості росту оксидних покриттів на алюмінієвому деформованому сплаві Д16Т під час плазмоелектролітичного оксидування використали: зміну складу та концентрацію компонентів електроліту; зміну струмових параметрів процесу плазмоелектролітичного оксидування.

В першому випадку відбувається утворення кисню та утворюється ОН, який під дією електричного поля буде швидше взаємодіяти з металом основи та змінить співвідношення між Н, О та ОН у розрядному каналі під час плазмоелектролітичного оксидування. У другому випадку – зростає напруженість електричного поля.

Для перевірки наведених вище гіпотез оксидокерамічні покриття формували згідно операцій розробленого технологічного процесу плазмоелектролітичного оксидування на сплаві Д16Т в електролітах такого складу: 1,5 g/l КОН + 2 g/l; рідке скло 1,5 g/l КОН + 2 g/l рідке скло + 5 g/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (56 %); 1,5 g/l КОН + 2 g/l рідке скло + 7 g/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (56 %); 1,5 g/l КОН + 2 g/l рідке скло + 10 g/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (56 %). Для дослідження впливу струмових параметрів плазмоелектролітичного оксидування експерименти проводили за таких значень співвідношень катодного струму до анодного струму відповідно: 10/10 та 10/15. Час формування оксидокерамічних покриттів у всіх дослідах становив 60 min. Покриті взірці виймали із гальванічної ванни, висушували на повітрі та вимірювали товщини оксидокерамічних покриттів. Отримані результати досліджень процесу плазмоелектролітичного оксидування алюмінієвого деформованого сплаву Д16Т представлені в таблиці 1.

Таблиця 1. Вплив технологічних параметрів процесу плазмоелектролітичного оксидування та товщину сформованих оксидокерамічних покриттів

№ з/п	Компонентний склад електроліту	Час формування покриття t, min	Відношення катодного до анодного струму J <sub>c</sub> /J <sub>a</sub>	Товщина покриття L, μm
1	1,5 g/l КОН + 2 g/l p.c.	60	10/10	60 ± 6
2	1,5 g/l КОН + 2 g/l p.c. + 3 g/l H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	60	10/10	74 ± 8
3	1,5 g/l КОН + 2 g/l p.c. + 5 g/l H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	60	10/10	90 ± 9
4	1,5 g/l КОН + 2 g/l p.c. + 7 g/l H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	60	10/10	100 ± 10
5	1,5 g/l КОН + 2 g/l p.c. + 10 g/l H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	60	10/10	70 ± 7
6	1,5 g/l КОН + 2 g/l p.c.	60	10/15	70 ± 7
7	1,5 g/l КОН + 2 g/l p.c. + 3 g/l H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	60	10/15	85 ± 9
8	1,5 g/l КОН + 2 g/l p.c. + 5 g/l H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	60	10/15	119 ± 12
9	1,5 g/l КОН + 2 g/l p.c. + 7 g/l H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	60	10/15	115 ± 12
10	1,5 g/l КОН + 2 g/l p.c. + 10 g/l H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	60	10/15	90 ± 9



Результати проведених експериментів показали, що додавання пероксиду водню в силікатно-лужний електроліт призводить до збільшення товщини отриманих оксидних покриттів для всіх досліджуваних електролітів та струмових режимів формування оксидного покриття. Максимальний приріст товщини оксидних покриттів спостерігався за концентрації  $\text{H}_2\text{O}_2$  від 5 g/l до 7 g/l. Подальше зростання вмісту пероксиду в електроліті призводить до зменшення товщини оксидного покриття для всіх вище розглянутих випадків. Цей ефект пояснюється зміною рН електроліту, яке приводить до розчинення алюмінію та його оксиду. Подібний ефект, хоча і не так яскраво виражений, проявляється в залежності товщини оксидних покриттів від концентрації КОН. Підвищення густини анодного струму до  $15 \text{ A/dm}^2$  по відношенню до густини катодного струму призводить до зростання товщини оксидокерамічного покриття особливо за величин концентрацій  $\text{H}_2\text{O}_2$  в діапазоні від 5 g/l до 7 g/l. У цьому випадку товщина оксидного покриття зростає на 40–50  $\mu\text{m}$  порівняно з покриттям, сформованим в електроліті без додавання пероксиду і досягає максимальної товщини  $119 \pm 12 \mu\text{m}$ .

#### **Висновки:**

1. Проведений аналіз способів інтенсифікації процесу плазмоелектролітичного оксидування показав перспективність раціонального вибору компонентного складу електролітів та струмових режимів для синтезу оксидокерамічних покриттів на алюмінієвому сплаві в електролітній плазмі.

2. Встановлено, що швидкість росту оксидокерамічного покриття можна суттєво підвищити шляхом збільшення кількості реагентів, які беруть безпосередню участь в процесі окислення алюмінію. Додавання в електроліт пероксиду водню призводить до збільшення товщини отриманих оксидокерамічних покриттів внаслідок росту концентрації  $\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{OH}^-$  в електроліті. Оптимальна концентрація  $\text{H}_2\text{O}_2$  складає від 5 g/l до 7 g/l. Ще більшого росту товщини оксидокерамічних покриттів можна досягти шляхом збільшенням величини співвідношення густини анодного до густини катодного струму.

У подальших дослідженнях планується вивчити вплив технологічних параметрів процесу плазмоелектролітичного оксидування на шорсткість поверхні оксидного покриття.

#### *Література*

1. Vlasiy O. Improving the aluminum drill pipes stability by optimizing the shape of protector thickening / O. Vlasiy, V. Mazurenko, L. Ropyak, O. Rogal // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – V. 1. – № 7(85). – P. 25-31.
2. Shats'kyi I.P. Combined Deformation Conditions for Fatigue Damage Indicator and Well-Drilling Tool Joint / I.P. Shats'kyi, O.M. Lyskanych, V.A. Kornuta // Strength of Materials. – 2016. – V. 48. – № 3. – P. 469-472.

3. Velichkovich A. Slotted shell resilient elements for drilling shock absorbers / A. Velichkovich, T. Dalyak, I. Petryk // Oil and Gas Science and Technology. – 2018. – V. 73. – Article number 2018043.
4. Pryhorovska T.O. Finite element modelling of rock mass cutting by cutters for PDC drill bits / T.O. Pryhorovska, S.S. Chaplinskiy, I.O. Kudriavtsev // Petroleum Exploration and Development. – 2015. – V. 42, – № 6. – P. 888-892.
5. Volchenko N. Features of the estimation of the intensity of heat exchange in selfventilated disk-shoe brakes of vehicles / N. Volchenko, A. Volchenko, D. Volchenko, P. Poliakov, V. Malyk, D. Zhuravliov, V. Vytvytskyi, P. Krasin // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019 – V. 1. – № 5(97). – P. 47-5.
6. Tatsiy R.M. Numerical study on heat transfer in multilayered structures of main geometric forms made of different materials / R.M. Tatsiy, O.Y. Pazen, S.Y. Vovk, L.Y. Ropyak, T.O. Pryhorovska // Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics. – 2019. – V. 13. – № 2. – P. 36-55.
7. Striletskyi Y. Method of studying corrosion processes of metal electrodes by surface voltage fluctuations / Y. Striletskyi, V. Rovinskyi, O. Yevchuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – V. 3. – № 9(81). – P. 24-29.
8. Dutkiewicz A. Some aspects of design and application of inertial dampers / A. Dutkiewicz, I. Gołębiowska, I. Shatskyi, V. Shopa, A. Velichkovich // MATEC Web of Conferences. – 2018. – V. 178. – Article number 06010 22 nd International Conference on Innovative Manufacturing Engineering and Energy, IManE and E 2018; Chisinau; Moldova; 31 May 2018 through 2 June 2018; Code 139365.
9. Levchuk K.G. Influence of mechanical properties of a material on dynamics of the stuck drilling pipes / K.G. Levchuk, V.M. Moisyshyn, I.V. Tsydylo // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. – 2016. – V. 38. – № 12. – P. 1655-1668.
10. Moisyshyn V. Investigation on Releasing of a Stuck Drill String by Means of a Mechanical Jar / V. Moisyshyn, K. Levchuk // Oil and Gas Science and Technology. – 2017. – V. 72. – № 5. – Article number 27.
11. Moisyshyn V. The impact of vibration mechanism' installation place on the process of retrieving stuck drill pipe / V. Moisyshyn, K. Levchuk // Mining of Mineral Deposits. – 2016. – V. 10. – № 3. – P. 65-76.
12. Pryhorovska T. Machining Error Influence on Stress State of Conical Thread Joint Details / T. Pryhorovska, L. Ropyak // Proceedings of the International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL Volume 2019-September, September – 2019. – Article number 9019544. – P. 493-497. 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL 2019; Sozopol; Bulgaria; 6 September 2019 through 8 September 2019; Category number CFP19814-ART; Code 158247.
13. Onysko O. Influence of the Thread Profile Accuracy on Contact Pressure in Oil and Gas Pipes Connectors / O. Onysko, V. Kopei, I. Medvid, L. Pituley, T. Lukan // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2020. – P. 432-

44. 13rd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE 2020; Kharkiv; Ukraine; 9 June 2020 through 12 June 2020; Code 240799.
14. Ropyak L. Influence of technological parameters of centrifugal reinforcement upon quality indicators of parts / L. Ropyak, I. Schuliar, O. Bohachenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – V. 1. – № 5(79). – P. 53-62.
15. Онисько легкі карб Онисько О. Р. Технологічні аспекти армування тіл обертання гранулами легких карбідів у процесі електрошлакового відцентрового лиття / О.Р. Онисько, О.М. Богаченко, Л.Я. Роп'як // *Сучасні технології в машинобудуванні*. – 2015. – Вип. 10. – С. 128-139.
16. Ropyak L. Optimization of process parameters of chrome plating for providing quality indicators of reciprocating pumps parts / L. Ropyak, V. Ostapovych // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – V. 2. – № 5(80). – P. 50-62.
17. Tarel'nik V.B. Improvement in Babbit Sliding Bearing Quality with Electrospark Alloying / V.B. Tarel'nik, V.S. Martsinkovskii, E.V. Konoplyanchenko, A.V. Belous, O.P. Gaponova // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2018. – V. 54. – № (7-8). – P. 598-604.
18. Луцак Д.Л. Електродугове наплавлення дисперсно-зміцнених композитних покриттів / Д.Л. Луцак, П.М. Присяжнюк, Л.С. Шлапак, Л.Я. Роп'як, М.Й. Бурда. – Івано-Франківськ: Вид-во ІФНТУНГ, 2018. – 151 с.
19. Студент М.М. Багатофункціональні електродугові покриття / М.М. Студент, Г.В. Похмурська, В.М. Гвоздецький, Т.Р. Ступницький, В.М. Посувайло, С.І. Маркович. – Львів: Простір-М, 2018. – 315 с.
20. Федірко В. М. Азотування титану та його сплавів / В. М. Федірко, І.М. Погрелюк. – К.: Наукова думка, 1995. – 221 с.
21. Critchlow G.W. Strategies for the replacement of chromic acid anodising for the structural bonding of aluminium alloys / G.W. Critchlow, K.A. Yendall, D. Bahrani, A. Quinn, F. Andrews // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. – 2006. – V. 26. – № 6. – P. 419-453.
22. Pokhmurs'kyi, V.I. Specific Features of the Cavitation-Erosion Fracture of D16T Alloy with Galvanic Nickel and Ni-B Composite Coatings in Corrosive Media / V.I. Pokhmurs'kyi, H.H. Veseliv's'ka, R.S. Mardarevych, // *Materials Science*. – 2016 – V. 52. – № 2. – P. 147-154.
23. Яворський В. Т. Електрохімічне нанесення металевих, конверсійних та композиційних покриттів / В. Т. Яворський, О. І. Кунтий, М. С. Хома. – Львів: Вид. «Львівська Політехніка», 2000. – 216 с.
24. Францевич И.Н. Анодные оксидные покрытия на металлах и анодная защита / И.Н. Францевич, А.Н. Пилянкевич, В.А. Лавренко, А.И. Вольфон. – К.: Наукова думка, 1985. – 280 с.
25. Abrahami S.T. Towards Cr(VI)-free anodization of aluminum alloys for aerospace adhesive bonding applications: A review / S.T. Abrahami, J.M.M. de Kok, H. Terryn, J.M.C. Mol // *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. – 2017.– V. 11. – № 3, – P. 465-482.

26. А.с. 526961 СССР, МКИ Н 01 G 9/24. Способ формовки анодов электрических конденсаторов / Марков Г.А., Маркова Г.В. (СССР). – № 1751524/26-21; заявл. 24.02.72; опубл. 30.08.76, Бюл. № 32.
27. Баковец В.В. Плазменно-электролитическая анодная обработка металлов / В.В. Баковец, О.В. Поляков, И.П. Долговесова. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1991. – 168 с.
28. Гордиенко П.С. Микродуговое оксидирование металлов и сплавов / П.С. Гордиенко, В.А. Достовалов, А.В. Ефименко. – Владивосток: Издательский дом Дальневосточного федерального университета, 2013.– 522 с.
29. Гнеденков С.В. Композиционные многофункциональные покрытия на металлах и сплавах, формируемые плазменным электролитическим оксидированием / С.В. Гнеденков, С.Л. Синебрюхов, В.И. Сергиенко. – Владивосток: Дальнаука, 2013. – 460 с.
30. Казанцев И.А. Технология получения композиционных материалов микродуговым оксидированием / И.А. Казанцев, А.О. Кривенков. – Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2007. – 240 с.
31. Черненко В.И. Получение покрытий анодно-искровым электролизом / В.И. Черненко, Л.А. Снежко, И.И. Папанова. – Л.: Химия, 1991.– 128 с.
32. Гордиенко П.С. Микродуговое оксидирование титана и его сплавов / П.С. Гордиенков, С.В. Гнеденков. – Владивосток: Дальнаука, 1997.– 186 с.
33. Снежко Л.А. Анодно-искровое оксидирование магния / Л.А. Снежко, В.С. Руднев. – М: Издательство «Техника», ТУМА ГРУПП, 2014. – 160 с.
34. Саакиян Л.С. Применение поверхностного упрочнения алюминиевых сплавов и покрытий для повышения коррозионно-механической стойкости деталей нефтегазопромыслового оборудования / Л. С. Саакиян, А. П. Ефремов, Л. Я. Ропяк, А. В. Эпельфельд. – М.: ВНИИОЭНГ, 1986. – Вып. 6(58). – 61 с. Обзорная информация: серия «Борьба с коррозией и защита окружающей среды».
35. Суминов И.В. Микродуговое оксидирование: теория, технология, оборудование / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин и др.; под ред. Т.А. Карасевой. – М.: ЭКОМЕТ, 2005. – 368 с.
36. Парфенов Е.В. Электролитно-плазменная обработка: моделирование, диагностика, управление / Е.В. Парфенов, Р.Р. Невьянцева, С.А. Горбатков, А.Л. Ерохин. – М: Машиностроение, 2014. – 380 с.
37. Мамаев А.И. Сильноточковые микроплазменные процессы в растворах электролитов / А.И. Мамаев, В.А. Мамаева. – Новосибирск: издательство СО РАН, 2005. – 255 с.
38. Борисов А.М. Микродуговое оксидирование в электролитах–суспензиях (обзор) / А.М. Борисов, Б.Л. Крит, В.Б. Людин, Н.В. Морозова, И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд // Электронная обработка материалов. – 2016. – № 1. – С. 50–77.
39. Malyshev V.N. Features of microarc oxidation coatings technology in slurry electrolytes / V.N. Malyshev, K.M. Zorin // Applied Surface Science. – 2007. – V.245. – № 5. – P. 1511-1516.

40. Шкилько А.М. Анализ способа упрочнения деталей микродуговым оксидированием / А.М. Шкилько, В.В. Тихоненко // Вісник Національного технічного університету „ХП”: зб. наук. праць. Тематичний вісник: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2010. – № 46. – С. 252-257.
41. Пат. 2199613 Российская Федерация, С25D 11/06. Способ формирования защитного покрытия на деталях запорной арматуры / Агабабян Р.Е.; Нечаев Г.Г.; заявитель и патентообладатель Агабабян Р.Е. – № 2001113639/02; заявл. 22.05.01; опубл. 27.02.03.
42. Пат. 2039133 Российская Федерация, С25D 11/02. Способ анодирования алюминия и его сплавов / Болотов А.Н., Новиков В.В., Созонтов К.К. и др; заявитель и патентообладатель Тверской государственный технический университет — № 92009341/26; заявл. 02.12.92; опубл. 09.07.95, Бюл. № 19.
43. Пат. 2424381 Российская Федерация, С25D 11/12. Способ получения износостойкого покрытия на алюминии и его сплавах / Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. и др; заявитель и патентообладатель Тверской государственный технический университет – № 2010123097/02; заявл. 07.06.10; опубл. 20.07.11, Бюл. № 20.
44. Sobolev A. Fabrication and Characterization of Ceramic Coating on Al7075 Alloy by Plasma Electrolytic Oxidation in Molten Salt / A. Sobolev, T. Peretz, K. Borodianskiy // Coatings. –2020. – V. 10. – № 10. – Article number 993.
45. Snizhko L.O. The nature of anodic gas at plasma electrolytic oxidation / L.O. Snizhko // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. – 2014. – V. 50. – № 6. – P. 705–708.

*Стаття надійшла до редакційної колегії 01.12.2020 р.*

## INFLUENCE OF PLASMA-ELECTROLYTIC OXIDATION PROCESS TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF ALUMINUM ON COATING GROWTH RATE

**V. M. Posuvailo<sup>1</sup>, V. V. Vytvytskiy<sup>2</sup>, M. M. Romaniv<sup>2</sup>,  
T. O. Pryhorovska<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine;  
5, Naukova str., Lviv, 79060, Ukraine; e-mail: [posuvaylo@ipm.lviv.ua](mailto:posuvaylo@ipm.lviv.ua);*

<sup>2</sup>*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;  
15, Carpathian str., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine; tel. +380(342)54-72-66*

*There has been carried out an analysis of methods of oxide covering formation productivity increasing during plasma electrolytic oxidation of aluminum in electrolyte. There has been developed a technology of blank manufacturing and part strengthening by plasma electrolytic oxidation in the electrolyte, as well as the workbench has been modernized. There has been*

*studied the process of oxidoceramic coating synthesis for the D16T aluminum deformed alloy of during plasma electrolytic oxidation in the electrolyte for different process parameters. It is established that the growth rate of oxidoceramic coating can be significantly increased by electrolyte component concentration involved in aluminum oxidation and rational choice of process electrical parameters. Hydrogen peroxide addition leads to obtained oxoceramic coating thickness increasing due to O, O<sub>2</sub>, OH, OH<sup>-</sup> concentration increasing in the electrolyte. It is established that the optimal concentration of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ranges from 5 g/l to 7 g/l. A further increase of peroxide concentration leads to a decrease in peroxide effect on oxoceramic coating growth rate on the D16T aluminum deformed alloy due to pH changes of the electrolyte and the deterioration of the oxide coating.*

**Key words:** *aluminum alloys, technological process, plasma electrolytic oxidation, electrolyte, hydrogen peroxide, the ratio of cathode and anode current densities, oxidoceramic coating, coating thickness.*