

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.793

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).44-53](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).44-53)

Ю.В. Кулешков, проф., докт. техн. наук, **М.В. Красота**, доц., канд. техн. наук, **Т.В. Руденко**, доц., канд. техн. наук, **Р.А. Осін**, доц., канд. техн. наук, **В. Д. Крошка**, магістрант

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: krasotamv@ukr.net

Зміцнення деталей з алюмінієвих сплавів мікродуговим оксидуванням

У статті наведено результати аналізу можливості використання нового способу зміцнення робочих поверхонь деталей – мікродугового оксидування для підвищення зносостійкості робочих поверхонь деталей, виготовлених з алюмінієвих сплавів, зокрема корпусів шестеренних насосів типу НШ. У роботі викладена сутність процесу зміцнення деталей мікродуговим оксидуванням, представлені основні фізико-механічні характеристики зміцнюючого покриття. Відзначено, що міцність зчеплення і механічні властивості покриття багато в чому залежать від стану зміцнюючої поверхні, зокрема від методу попередньої обробки. При цьому встановлено, що зміцнюючі покриття металу після пластичного деформування мають більшу міцність зчеплення, більшу товщину і твердість. Представлені основні відомості про мікродугове оксидування, які на думку авторів будуть сприяти освоєнню маловивченого способу зміцнення в ремонтному виробництві.

мікродугове оксидування, зміцнення алюмінієвих сплавів, пластичне деформування, міцність зчеплення, зносостійкість, мікротвердість покриття, металокераміка

Постановка проблеми. Одним з найбільш розповсюджених насосів гідросистем, що знайшли своє використання на самій різноманітній техніці є шестеренний насос. Шестеренний насос відрізняється низькою собівартістю виготовлення та забезпечує необхідні технічні характеристики.

Шестеренні насоси працюють в умовах підвищеної запиленості, різких коливаннях температури повітря, високих тисків робочих рідин, що призводить до інтенсивного зношування деталей, зокрема, виготовлених з алюмінієвих сплавів. А тому відновлення і зміцнення деталей шестеренних насосів, виготовлених з алюмінієвих сплавів, є вельми актуальним задачею.

Відомо, що середній ресурс відремонтованих шестеренних насосів становить не більше 50% ресурсу нового насоса. А отже пошук нових технологічних рішень для відновлення і зміцнення зношених поверхонь шляхом підвищення зносостійкості з'єднань деталей насосів за рахунок поліпшення їх фізико-механічних властивостей є актуальною задачею ремонтного виробництва.

Ресурс шестеренних насосів значно менше міжремонтного ресурсу інших агрегатів гідросистеми через низьку зносостійкість робочих поверхонь деталей, що утворюють прецизійні пари тертя.

Однак, застосовувані в даний час технологічні процеси відновлення деталей, не завжди задовольняють сучасним вимогам, зокрема, багато хто з них не дозволяють зміцнювати робочі поверхні, що негативно позначається на ресурсі деталей.

Нами пропонується перспективний спосіб відновлення і зміцнення деталей з алюмінію і його сплавів, а саме мікродугове оксидування. Мікродугове оксидування доцільно використовувати в ремонтному виробництві, воно дозволяє отримувати зносостійкі покриття.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Корпус шестеренного насоса виготовляють з алюмінієвого сплаву АЛ 9. Зносостійкість корпусу бажає бути кращою, що є однією з причин недостатньої надійності шестеренного насоса. В процесі ремонту є можливість усунути цей недолік.

Існують декілька напрямків відновлення корпусів шестеренних насосів. Серед них наступні.

Відновлення корпусів шестеренних насосів типу методом збільшених ремонтних розмірів. Сам корпус відновлюється надзвичайно просто - розточуванням його до виведення слідів зношування під збільшений ремонтний розмір. Але зазначений спосіб потребує виготовлення шестерень і втулок ремонтного розміру, що нанівець зведе економічну доцільність способу

Відновлення корпусів шестеренних насосів методом нанесення полімерних матеріалів дозволяє знизити трудомісткість відновлення деталей на 20...30%, а собівартість ремонту - на 15...20%.

Низька теплопровідність полімерних композицій обмежують область їх застосування в ремонтному виробництві.

Основна перевага це:

- він є відносно простим і дешевим.

Основні недоліки:

- невисока механічна властивість, особливо при підвищених температурах;
- низька адгезія;
- схильність до втомному викришування;
- низька теплопровідність.

Відновлення корпусів шестеренних насосів постановою алюмінієвих або чавунних гільз полягає в наступному. Внутрішню поверхню колодязів розточують під збільшений розмір. На знежирені поверхні гільзи і корпусу наносять епоксидний клейовий склад і запресовують гільзу. Потім протягом 2 годин корпус висушують у сушильній шафі при температурі 180 ... 220°C. Основним недоліком даного способу є те, що він не доцільний при малому зношуванні деталі.

Основні недоліки способу:

- висока трудомісткість способу;
- поява двох кордонів на шляху відведення тепла з робочої зони є причиною підвищеної теплонапруженості відновленого корпусу;
- зниження жорсткості і міцності деталі, що може стати причиною спотворення форми деталі або навіть її руйнування;

Електролітичні антифрикційні та зносостійкі покриття широко застосовуються для відновлення зношених деталей і машин. Перспективними покриттями на основі цинку є сплави цинк-залізо, цинк-нікель і деякі інші. Сплав цинку з залізом за своїми фізико-механічними властивостями (теплопровідність, антифрикційних, зносостійкість) найбільш наближений до алюмінієвих сплавів. Разом з тим за деяких умов експлуатації (високі температури, циклічні навантаження і т.д.) потрібні більш зносостійкі покриття. Для цього застосовуються сплави цинку з нікелем.

Нанесенням вищевказаних гальванічних покриттів відновлюють колодязі шестеренних насосів. Слід зазначити, що покриття, нанесені електролітичними способами, характеризуються порівняно невисокою адгезією з основою і багатоопераційністю, а також значним забрудненням оточуючого середовища, що

потребує наявність спеціальних очисних споруд.

Таким чином, нанесення покриттів вище перерахованими способами далеко не завжди задовольняє тим вимогам, які пред'являються до матеріалів триботехнічного призначення.

Основними недоліками способу є:

- недостатня адгезія з основним металом;
- невисока міцність зчеплення;
- недостатня теплопровідність;
- дороге і складне устаткування.

Відновлення корпусів шестеренних насосів типу НШ способом дифузійної металізації. Спосіб дифузійної металізації полягає в термодифузійному насиченні цинком алюмінієвого сплаву. У результаті дифузії відбувається збільшення розміру деталі, при цьому її нагрівають до температури 550°C. Процес характеризується досить великою часовою протяжністю (близько 4-х годин).

До основних недоліків слід віднести:

- високу трудомісткість та енергоємність;
- необхідність застосування дорогого вакуумного обладнання;
- послаблення жорсткості і міцності деталі, що може стати причиною спотворення форми деталі або навіть її руйнування;
- недостатня теплопровідність відновленого корпусу.

На вищевказаних недоліків у ремонтному виробництві широкого застосування він не знайшов.

Відновлення корпусів шестеренних насосів способом пластичного деформування (обтисканням) набуло широкого поширення. Відновлення деталей способом пластичних деформацій засноване на використанні запасу міцності і пластичних властивостей матеріалу.

При відновленні корпусів пластичним деформуванням і подальшим розточенням отримують додаткові три ремонтних розміру по діаметру. При цьому зменшення міжцентрової відстані між колодязями дозволяє повністю компенсувати зменшення робочого об'єму насоса, що відбувається внаслідок зменшення розміру шестерень по зовнішньому діаметру.

Перевагою способу є:

- економічна ефективність, так як не потрібні ремонтні матеріали для відновлення;
- підвищення механічних властивостей матеріалу деталі;
- підвищення жорсткості корпусу за рахунок створення напруженб стискання;
- збільшення ресурсу роботи насоса в 1,6 рази при порівнянні з гільзованими корпусами і в 4 рази при використанні розчину з епоксидних смол.

На завершення слід відмітити, що жоден із згаданих методів відновлення корпусу шестеренного насоса не в змозі суттєво підвищити його зносостійкість.

Як зазначено раніше одним із суттєвих недоліків деталей, які виготовляються з алюмінієвих сплавів є їх низька зносостійкість. Це пояснюється низькою твердістю цих сплавів. В даний час не існує дієвих методів, що здатні суттєво підвищити зносостійкості робочих поверхонь, виготовлених із алюмінієвих сплавів.

Аналіз існуючих методів відновлення і зміцнення деталей з алюмінієвих сплавів, зокрема корпуса шестеренного насоса дає підстави зробити наступні висновки. Існуючі способи відновлення алюмінієвих деталей шестеренних насосів не завжди забезпечують необхідну довговічність тертьових поверхонь. Крім того, застосування їх часто стримується складністю і високою вартістю необхідного обладнання і матеріалів.

Перспективним способом, що дозволяє значно збільшити зносостійкість

алюмінієвих деталей, є мікродугового оксидування. Однак він недостатньо вивчений і широкого практичного досвіду його застосування для відновлення і зміцнення деталей з ливарних алюмінієвих сплавів немає.

Постановка завдання. Метою досліджень є проведення аналізу науково-технічної інформації, щодо визначення можливості зміцнення деталей з алюмінієвих сплавів мікродуговим оксидуванням, зокрема корпусів шестеренних насосів.

Викладення основного матеріалу. Одним з методів відновлення в зміцнення деталей з алюмінієвих сплавів є метод МДО - мікродугове оксидування .

Відновлення і зміцнення деталей з алюмінієвих сплавів МДО полягає в тому, що на алюмінієву деталь, розташовану в електролітичній ванні через спеціальний джерело живлення подається струм, що призводить до утворення на поверхні деталі мікроплазмових розрядів, під впливом яких поверхневий шар деталі перетворюється на оксид алюмінію. На поверхні деталі утворюється міцний шар кераміки завтовшки до 300 мкм [1 -8].

Фізична сутність методу МДО полягає в тому, що при пропусканні струму великої щільності через границю розділу метал-електроліт створюються умови, коли напруженість на границі розділу стає вище її діелектричної міцності і на поверхні електрода виникають мікроплазменні розряди з високими локальними температурами і тисками. Мікроплазмові розряди між електродом і деталлю формують шар покриття, що складається з оксиду металу основи і складових електроліту. Залежно від режиму мікроплазмового оксидування і складу електроліта можна отримувати керамічні покриття товщиною до 300 мкм з унікальними характеристиками зносостійкості і широким спектром застосування [1 – 8].

До основних переваг МДО відносяться [1, 4, 9, 10]:

- можливість створення надміцних покриттів з унікальними характеристиками;
- отримання кількох захисних характеристик в комплексі;
- можливість обробки деталей із складним профілем;
- немає необхідності в спеціальній підготовці поверхні перед нанесенням покриття і механічній обробці після нанесення покриття;
- регулювання швидкості процесу в широкому діапазоні;
- отримання різних покриттів на одному матеріалі.
- дешевизна і доступність хімічних реактивів;
- отримання багатофункціональних покриттів заданого складу, структури і товщини;
- нанесення покриттів, однорідних за якістю і товщині, як на зовнішні, так і на внутрішні поверхні деталей будь-якої форми;
- екологічність процесу, що виражається у відсутності токсичних хімічних компонентів і спеціальних очисних споруд для відпрацьованих електролітів.

В залежності від хімічного складу сплаву, режимів МДО та компонентів електроліту на деталях з алюмінієвих сплавів формуються складні по фазовим складом покриття, що включають в себе високотемпературні модифікації α γ оксидів Al_2O_3 , фази муллита і інші складні сполуки в перехідному шарі між покриттям і металом. Такі покриття, сформовані з лужного електроліту, можна розглядати як композиційні, в яких оксиди α - Al_2O_3 є зміцнюючою фазою. Мікротвердість таких покриттів досягає 20...25 Гпа, що зіставно з твердістю абразивних часток [3 - 16].

Покриття, нанесені способом МДО, володіють високими теплоізоляційними властивостями і стійкі до теплового удару. Вони можуть бути використані в якості жаростійких і теплозахисних. Міцність зчеплення з основою покриттів, одержаних способом МДО, досягає 350 МПа. Це, безумовно, дає можливість застосовувати їх при

великих контактних навантаженнях. Окрім того, зносостійкість зазначених покриттів, порівнянна з зносостійкістю матеріалів на основі карбиду вольфраму.

Але в ремонтному виробництві вищевказаний спосіб широкого поширення не отримав, що пояснюється недостатнім вивченням способу, особливо стосовно до відновлення і зміцнення ливарних алюмінієвих сплавів, відсутність технологічних рекомендацій для відновлення конкретних деталей, тощо.

Одним з основних напрямків досліджень є обґрунтування вибору складу електроліту та режимів нанесення покриття за допомогою МДО, що пояснюється тим, що робочим середовищем, для одержання покриттів МДО є спеціальний електроліт.

При виборі виду і складу електроліту для відновлення і зміцнення алюмінієвих деталей шестеренних насосів необхідно враховувати, що в умовах ремонтних підприємств до електролітів пред'являються наступні вимоги [1 - 10]:

- електроліт повинен забезпечувати можливість отримання на деталях покриттів з високими фізико-хімічними властивостями;
- властивості отриманих покриттів повинні знаходитися в суворій відповідності з заданими режимами електролізу і регулюватися ними в широких межах;
- отримання покриття повинна бути максимально продуктивною;
- електроліт повинен бути простим за складом, надійним в експлуатації та екологічно безпечним;
- матеріали, що застосовують для приготування електроліту повинні бути дешевими і недефіцитними;
- способи контролю і коректування електроліту повинні бути прості і доступні для ремонтних підприємств.

Електроліти для МДО діляться на чотири основні групи [1 - 10]:

- розчини, в яких зміцнений шар утворюється за рахунок окислення металу (розчини кислот і лугів);
- розчини, в яких покриття створюється за рахунок аніонів електроліту (розчини рідкого скла);
- розчини, в яких покриття формується за рахунок окислення металу і за рахунок аніонів електроліту (суміші розчинів першого і другого типів);
- розчини, які містять дрібнодисперсні частинки.

В електролітах першої групи покриття формується переважно завдяки окисленню алюмінію. В електролітах другої і третьої груп відбувається не тільки окислення алюмінію, а й включення до складу покриття речовини з електроліту. В електролітах четвертої групи покриття формується в основному з матеріалу, який є в них у вигляді суспензії [9 - 16].

Завдяки тому, що процес ведуть в умовах іскрового розряду на поверхні окисленої деталі при локальних температурах в зоні реакції 700...750°C, композиційні добавки, що знаходяться в електроліті у вигляді порошків, сплавляються з іншими компонентами покриття. Це дозволяє створити міцне керамічне покриття, модифіковане необхідними включеннями.

Застосування електролітів з включеннями оксиду алюмінію, оксиду титану та інших матеріалів, введених до складу електроліту, дозволяє формувати покриття з наперед заданими характеристиками, що істотно розширює можливість отримання покриттів з різними функціональними властивостями.

У промисловості найбільше застосування отримали електроліти першої групи. Одним з найпростіших і визнаних електролітів цієї групи став розчин, що містить КОН 2...8 г/л, який дає можливість отримувати якісні керамічні покриття на алюмінієвих сплавах. З цією ж метою можуть використовуватися розчини деяких кислот (сірчана, фосфорна, щавлева, лимонна і ін.), серед яких найбільшого поширення набула сірчана

кислота. Слід зазначити, що сірчана кислота, як і інші, придатна лише в концентрованому вигляді, так як розбавлена кислота не здатна пасивувати алюміній, що є вирішальним фактором при веденні МДО.

Склади декількох найбільш поширених електролітів, що використовуються при МДО, і зразкове призначення одержуваних керамічних покриттів представлені в табл.1.

Таблиця 1 – Склад електролітів і зразкове призначення формованих у них покриттів при МДО

Склад електроліту, г/л Н ₂ O	Товщина покриття, мкм	Призначення покриття
1. Гідрооксид калію – 2...8	50...100	Підвищення зносостійкості, захист від корозії
2. Натрієве рідке скло - 180 ... 200, гідрооксид калію - 75 ... 84	300...500	Захист від термічного впливу
3. Натрієве рідке скло - 20 ... 60	100...150	Підвищення зносостійкості, захист від корозії
4. Гідроксид натрію - 15 ... 30 5. Натрієве рідке скло - 80 ... 120, оксид алюмінію - 10 ... 20	25...200	Захист від термічного впливу
6. Гідроксид калію - 2 ... 3, натрієве рідке скло - 8 ... 10, пероксид водню - 2,5 ... 10	150...200	Підвищення зносостійкості
7. Алюмінат натрію - 25 ...50	200...300	Захист від корозії і термічного впливу
8. Натрій фосфорно-молібденово-кислий - 10 ... 100	5...20	Захист від корозії
9. Концентрована сірчана кислота	15...50	Зміцнення, захист від корозії

Джерело: розроблено авторами на підставі [1 - 10]

При використанні електролітів першої групи геометричні розміри оброблюваних деталей змінюються незначно. Зміцнююче покриття формується з внутрішньої сторони. У цьому випадку покриття заглиблюється в метал, а зовнішній дійсний розмір деталі змінюється в межах 10% від товщини сформованої плівки на величину зовнішнього шару покриття, який при подальшій фінішній механічній обробці повністю вилучається [1, 4, 9, 10].

Особливий інтерес представляють електроліти 2-ий і 3-ей груп, здатні утворювати покриття за рахунок катіонів розчину. До даних електролітів можна віднести розчини силікатів лужних металів.

Проведені нами попередні дослідження з оксидуванню алюмінієвих ливарних сплавів в електроліті, що містить силікат натрію, показали, що електроліз розчинів рідкого скла призводить до формування товстощарові покриттів (до 0,5 мм). Однак покриттям, отриманим у вищевказаному електроліті, властива низька адгезія і зносостійкість.

З вищевказаного бачимо, що якість зміцнюючих покриттів можна суттєво покращити, якщо інтегрувати електроліти, що належать до різних груп. Однією з таких комбінацій електролітів є електроліт типу «KOH – Na₂SiO₃».

Концентрація KOH буде впливати на травну здатність електроліту, що дозволить сформувати зміцнений шар всередину оксидованої поверхні щодо номінального розміру деталі і збільшити адгезію покриттів. Введення ж рідкого скла дозволить

формувати покриття за рахунок його компонентів, що в кінцевому підсумку призведе до можливості не тільки зміцнення, а й отримання достатньої товщини покриття для відновлення алюмінієвої деталі.

Використання електролітів типу «KOH – Na₂SiO₃», дасть можливість не тільки зміцнювати алюмінієві деталі при МДО, але й відновлювати їх розміри за рахунок компонентів електроліту.

В залежності від хімічного складу сплаву, режимів МДО і додаткових компонентів електроліту на деталях з алюмінієвих сплавів формуються складні по фазовому складу покриття, що включають в себе високотемпературні модифікації оксидів Al₂O₃. Такі покриття, сформовані з лужного електроліту, можна розглядати як композиційні, в яких оксиди Al₂O₃ є зміцнюючою фазою. Мікротвердість таких покриттів досягає 20...25 ГПа [3 - 16].

Таким чином, на деталях, оброблених МДО утворюються покриття, які являють собою кераміку складного складу, що утворюється за рахунок окислення поверхні металу. Товщину покриття можна регулювати за рахунок включення до його складу елементів з електроліту. Слід відмітити, що технологія МДО при необхідності дозволяє ввести в покриття будь-який потрібний хімічний елемент.

Ряд авторів [3, 14 - 17] також вказують на те, що оксидне покриття, отримане МДО, по суті, представляє з себе композиційний матеріал, який поєднує в собі доволі пластичну матрицю, що складається з твердого розчину муллита 3 Al₂O₃ • 2SiO₂ із незначною кількістю γ-Al₂O₃ і складнооксидних сполук елементів основи із зміцнюючою фазою α - Al₂O₃ (до 65%), яка, головним чином, і забезпечує високу зносостійкість покриттів.

Твердість покриттів, отриманих мікродуговим оксидуванням досягає 21 ГПа. Вимірювання твердості проводили за допомогою приладу Nano Hardness Tester, при нарузке на індентор - 200 Н. Твердість покриттів розраховували виходячи із глибини проникнення індентора [6, 8, 13, 14, 21, 22].

У роботах [18 - 20] зазначено, що зносостійкість покриттів, сформованих способом МДО, не поступається зносостійкістю композиційних матеріалів на основі карбідів вольфраму, що традиційно застосовуються проти абразивного зношування матеріалів.

Чим більше часу проводити обробку деталі, тим більше елементів з електроліту накопичується в поверхневому шарі. Нижній шар покриття, що прилягає до металу-основи, складається переважно з його оксидних сполук.

Товщина покриттів визначається декількома основними чинниками. Це природа електроліту, матеріал сплаву металу, режим обробки і час процесу. Мікродугове оксидування дозволяє отримувати покриття різної товщини від 1 мкм до 500 мкм.

Необхідна товщина покриття залежить від призначення і умов експлуатації. Для нанесення підшару під фарбування досить 5-10 мкм, для додання електроізоляційних властивостей або високої зносостійкості необхідно 50...100 мкм. Декоративні властивості та антикорозійні властивості в атмосферних умовах забезпечують 20...40 мкм покриття.

Покриття, що були отримані МДО можуть бути використані як зносостійкі покриття в різних вузлах і агрегатах машин і механізмів. Зокрема використовувати деталі з алюмінієвих сплавів в якості з'єднань, що підлягають зношуванню.

Таким чином, проведені порівняльні дослідження зносостійкості дозволили встановити, що покриття, отримані мікродуговим оксидуванням, мають високу зносостійкість. Отже, можна зробити висновок, що керамічні покриття, отримані МДО можуть бути рекомендовані для відновлення і зміцнення алюмінієвих деталей шестеренних насосів, зокрема корпусу насоса.

Висновки.

1. Фізико-механічні властивості покриттів, отриманих на деталях з алюмінієвих сплавів, дозволять значно збільшити їх зносостійкість, а, отже, довговічність і є перспективним напрямком розвитку ремонтного виробництва в сучасних умовах.

2. Зношування пар тертя з покриттями, сформованими при використанні раціонального складу електроліту і раціональних режимах МДО при сполученні «корпус-шестерня», в 2,5 рази вище, ніж у аналогічних без покриттів, прийнятих за еталон порівняння.

3. На підставі проведених досліджень розроблено технологічний процес зміцнення МДО корпусу і втулок насосів типу НШ.

Список літератури

1. Николаев А.В., Марков Г.А., Пещевский В.И. Новое явление в электролизе. *Изв. СО АН СССР. Серия "Химические науки"*. 1977. Вып. 5, № 12. С. 32-34.
2. Яковлев С.Я., Кравецкий Г.Л., Другов П.Н. Микродуговой электролиз на угольных материалах. *Вестник МВТУ им. Баумана. Серия "Машиностроение"*. 1992. С. 25-34.
3. Павлюс С.Г., Соборнитский В.Я., Шепрут Ю.А. Диэлектрические свойства анодно-искровых силикатных покрытий на алюминии. *Электронная обработка материалов*. 1987. № 3. С. 34-36.
4. Микродуговое оксидирование. / Марков Г.А., Белеванцев В.И., Терлеева О.П., Шулейко Е.К., Слонова А.И. *Вестник МВТУ им. Баумана. Серия "Машиностроение"*. 1992. № 1. С. 34- 56.
5. Батищев А.Н., Новиков А.Н., Кузнецов Ю.А. Восстановление алюминиевых деталей сельскохозяйственной техники микродуговым оксидированием. *Инженерно-техническое обеспечение АПК*. 1996. № 4. С. 18-19.
6. Черненко В.И., Снежко Л.А., Потапова И.И. Получение покрытий анодно-искровым электролизом. Москва: Химия, 1991. 128 с.
7. Снежко Л.А., Черненко В.И. Энергетические параметры процесса получения оксидных покрытий на алюминии в режиме искрового разряда. *Электронная обработка материалов*. 1983. № 2. С. 25-28.
8. Ван Тран Бао и др. Механизм анодного искрового осаждения металлов. *Реферативный журнал "Химия"*. 1978. № 1. С. 41.
9. Снежко Л.А., Удовиченко Ю.В., Тихая Л.С. Свойства анодно-искровых покрытий, сформированных на сплавах алюминия из щелочных электролитов. *Физика и химия обработки материалов*. 1989. № 3. С. 93-96.
10. Федоров В.А. Модифицирование микродуговым оксидированием поверхностного слоя деталей. *Сварочное производство*. 1992. № 8. С. 29-30.
11. Каракозов Э.С., Чавдаров А. В., Барыкин Н.В. Микродуговое оксидирование - перспективный процесс получения керамических покрытий. *Сварочное производство*. 1993. № 6. С. 4-7.
12. Восстановление и упрочнение деталей из алюминиевых сплавов микродуговым оксидированием. / Новиков А.Н., Батищев А.Н., Кузнецов Ю.А., Коломейченко А.В. Орел: Орел ГАУ, 2001. 99 с.
13. Казанцев И.А., Чуфистов О.Е., Голованова Н.В., Уткин А.А., Симцов В.В. Влияние микродугового оксидирования на фазовый состав и свойства покрытий алюминия. *Мат. 4-го собрания металловедов России*. Ч. I. Пенза: Приволжский Дом знаний, 1998. С. 105-107.
14. Кузнецов Ю.А. Износостойкость покрытий при микродуговом оксидировании алюминиевых сплавов. *Использование научного потенциала вузов в решении проблем научного обеспечения АПК в России: материалы Междунар. науч.-практ. конф.* ОрелГАУ, 2001. С. 229-230.
15. Новиков А.Н. Технологические основы восстановления и упрочнения деталей сельскохозяйственной техники из алюминиевых сплавов электрохимическими способами. Орел: ОрелГАУ, 2001. 233 с.
16. Федоров В.А., Великосельская Н.Д. Влияние микродугового оксидирования на износостойкость алюминиевых сплавов. *Трение и износ*. 1989. Т. 10, №3. С. 521-524.
17. Снежко Л.А. Импульсный режим для получения силикатных покрытий в искровом разряде. *Защита металлов*. 1988. Т. 16, № 3. С. 365.
18. Малышев В.Н., Булычев С.Н., Марков Г.А. Физико-механические характеристики и износостойкость покрытий, нанесенных методом микродугового оксидирования. *Физика и химия обработки материалов*. 1985. № 1. С. 82-87.

19. Федоров В.А., Великосельская Н.Д. Взаимосвязь фазового состава и свойств упрочненного слоя, получаемого при микродуговом оксидировании алюминиевых сплавов. *Химическое и нефтяное машиностроение*. 1991. №3. С. 29-30.
20. Петросянц А.А., Малышев В.Н., Федоров В.А., Марков Г.А. Кинетика изнашивания покрытий, нанесенных методом микродугового оксидирования. *Трение и износ*. 1984. Т. 5, № 2. С. 350-354.
21. Кузнецов Ю.А., Коровин А.Я. Восстановление деталей газотермическими покрытиями с последующим упрочнением микродуговым оксидированием. *Развитие села и социальная политика в условиях рыночной экономики: материалы Междунар. научн.-практ. конф., посвященной 70-летию МГАУ*. Москва: МГАУ им. В.П. Горячкина. 2001. Ч. 1. С. 143-144.
22. Коровин А.Я. Технология восстановления и упрочнения деталей гидравлических шестеренных насосов типа НШ-У микродуговым оксидированием: дис. ... канд. техн. наук. / Орловский гос. аграрный ун-т. Орел, 2003. 137 с.

References

1. Nikolaev, A.B., Markov, G.A. & Peshevickiy, B.I. (1977). Noye yavlenie v elektrolize [A new phenomenon in electrolysis]. *Izv. CO AN SSSR. Seriy "Himicheskie nauki" – Izv. Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. Series "Chemical Sciences". Vol. 5, № 12.* 32-34. [in Russian].
2. Yakovlev, S.Y., Kraveckiy, G.L. & Drugov, P.N. (1992). Mikrodugovoy elektroliz na ugolnykh materialakh [Microarc electrolysis on coal materials]. *Vestnik MVTU im. Baumana. Seriy "Mashinostroenie" – Vestnik MVTU im. Bauman. Series "Mechanical Engineering".* 25-34. [in Russian].
3. Pavlus, S.G., Sobornitskiy, V.Y. & Sheprut, U.A. (1987). Dielektricheskie svoystva anodno-iskrovuh silikatnykh pokrytiy na aluminii [Dielectric properties of anode-spark silicate coatings on aluminum]. *Elektronnyy obrabotka materialov – Electronic material processing.* № 3. 34-36. [in Russian].
4. Markov, G.A., Belevancev, V.I., Terleeva, O.P., Shuleyko, E.K. & Slonova, A.I. (1992). Mikrodugovoe oksidirovanie [Microarc oxidation]. *Vestnik MVTU im. Baumana. Seriy "Mashinostroenie" – Vestnik MVTU im. Bauman. Series "Mechanical Engineering".* № 1. 34- 56. [in Russian].
5. Batishev, A.N., Novikov, A.N. & Kuznecov, U.A. (1996). Vosstanovlenie aluminievykh detaley sel'skokozyustvennoy tehniky mikrodugovym oksidirovaniem [Restoration of aluminum parts of agricultural machinery by micro-arc oxidation]. *Inzhenerno-tehnicheskoe obespechenie APK – Engineering and technical support of the AIC.* № 4. 18-19 [in Russian].
6. Chernenko, V.I., Snezhko, L.A. & Potapova, I.I. (1991). *Poluchenie pokrytiy anodno-iskrovum elektrolizom [Preparation of coatings by anode-spark electrolysis]*. Moscow: Himiy [in Russian].
7. Snezhko, L.A. & Chernenko, V.I. (1983). Energeticheskie parametry processa polucheniya oksidnykh pokrytiy na aluminii v rezhime iskrovogo razryada [Energy parameters of the process of obtaining oxide coatings on aluminum in the spark discharge mode]. *Elektronnyy obrabotka materialov – Electronic material processing.* № 2. 25-28. [in Russian].
8. Van Tran Bao. (1978). Mehanizm anodnogo iskrovogo osazhdeniya metallov [Mechanism of anodic spark deposition of metals]. *Referativnyy zhurnal "Himiy" – Abstract journal "Chemistry".* № 1. 41 [in Russian].
9. Snezhko, L.A., Udovichenko, U.B. & Tihaya, L.S. (1989). Svoystva anodno-iskrovuh pokrytiy sformirovannykh na splavakh aluminiiy shelochnykh elektrolitov [Properties of anode-spark coatings formed on aluminum alloys from alkaline electrolytes]. *Fizika i himiy obrabotki materialov – Physics and Chemistry of Material Processing.* № 3. 93-96. [in Russian].
10. Fedorov, V.A. (1992). Modificirovanie mikrodugovum oksidirovaniem poverhnostnogo sloya detaley [Modification of the surface layer of parts by microarc oxidation]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production.* № 8. 29-30. [in Russian].
11. Karakozov, E.S., Chavdarov, A.B. & Barukin, N.V. (1993). Mikrodugovoe oksidirovanie – perspektivnyy process polucheniya keramicheskikh pokrytiy [Microarc oxidation - a promising process for obtaining ceramic coatings]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production.* № 6. 4-7. [in Russian].
12. Novikov, A.N., Batishev, A.N., Kuznecov, U.A. & Kolomeychenko, A.V. (2001). Vosstanovlenie i uprochnenie detaley iz aluminievykh splavov mikrodugovym oksidirovaniem [Recovery and strengthening of aluminum alloy parts by micro-arc oxidation]. Orel: Orel GAU [in Russian].
13. Kazancev, I.A., Chufistov, O.E., Golovanova, N.V., Utkin, A.A. & Simcov, V.V. (1998). Vliyanie mikrodugovogo oksidirovaniya na fazovyy sostav i svoystva pokrytiy aluminiiy [Effect of microarc oxidation on the phase composition and properties of aluminum coatings]. *Mat. 4 sobraniya metalloedov Rossii. Ch. I.* - Penza: Privolzhskiy dom znaniy. P.105-107. [in Russian].
14. Kuznecov, U.A. (2001). Iznosostoykost pokrytiy pri mikrodugovom oksidirovanii aluminievykh splavov [Wear resistance of coatings during microarc oxidation of aluminum alloys]. *Ispolzovanie nauchnogo*

- potenciala vuzov v reshenii problem nauchnogo obespecheniya APK v Rossii: Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii. Orel GAU, P. 229-230. [in Russian].*
15. Novikov, A.N. (2001). *Tehnologicheskie osnovy vosstanovleniya i uprochneniya detaley selskohozyastvennoy tehniky iz aluminievuh splavov elektrohimičeskimi sposobami [Technological bases of restoration and strengthening of agricultural machinery parts from aluminum alloys by electrochemical methods]. Orel: Orel GAU [in Russian].*
 16. Fedorov, V.A. & Velikoselskaya, N.D. (1989). Vliyanie mikrodrugovogo oksidirovaniya na iznosostoykost aluminievuh splavov [Effect of microarc oxidation on the wear resistance of aluminum alloys]. *Trenie i iznos – Friction and wear. Vol. 10, №3. 521-524. [in Russian].*
 17. Snezhko, L.A. (1988). Impulsnyy rezhim dlya polucheniya silikatnyh pokrutiy v iskrovom razryde [Pulse mode for obtaining silicate coatings in a spark discharge]. *Zashita metallov – Protection of metals. Vol. 16, № 3.365. [in Russian].*
 18. Malushev, V.N., Buluchev, S.N. & Markov, G.A. (1985). Fiziko-mehanicheskie harakteristike i iznosostoykost pokrutiy, nanesennyh metodom mikrodrugovogo oksidirovaniya [Physico-mechanical properties and wear resistance of coatings deposited by the method of micro-arc oxidation]. *Fizika i himiya obrabotke materialov – Physics and Chemistry of Material Processing. № 1. 82-87. [in Russian].*
 19. Fedorov, V.A. & Velikoselskaya, N.D. (1991). Vzaimosvyaz fazovogo sostava i svoustv uprochnennogo sloya, poluchaemogo pri mikrodrugovom oksidirovanii aluminievuh splavov [The relationship between the phase composition and properties of the hardened layer obtained by microarc oxidation of aluminum alloys]. *Himičeskoe i nefyanoє mashinostroenie – Chemical and petroleum engineering. №3. 29-30. [in Russian].*
 20. Petrosyanc, A.A., Malushev, V.N., Fedorov, V.A. & Markov, G.A. (1984). Kinetika iznashivaniya pokrutiy, nanesennyh metodom mikrodrugovogo oksidirovaniya [The kinetics of wear of the coatings deposited by the method of micro-arc oxidation]. *Trenie i iznos – Friction and wear. Vol. 5, № 2. 350-354 [in Russian].*
 21. Kuznecov, U.A. Korovin, A.Y. (2001). Vosstanovlenie detaley gazotermicheskimy pokrutiyami s posleduyshim mikrodrugovom oksidirovaniiem [Restoration of parts by gas-thermal coatings with subsequent hardening by micro-arc oxidation]. *Razvitie sela i socialnaya politika v usloviyah rinochnoy ekonomiki: Materialu mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii posveshennoy 70-leiyu MGAU. Moskova: MGAU im. V.P. Gorychkina. Issue. 1. 143-144. [in Russian].*
 22. Korovin, A.Y. (2003). Tehnologiya vosstanovleniya i uprochneniya detaley gidravlicheskih shesterennyh nasosov tipa NSh mikrodrugovom oksidirovaniiem [Technology of restoration and strengthening of parts of hydraulic gear pumps of the NSh-U type by micro-arc oxidation]. *Candidate's thesis. Orlovskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet. Orel [in Russian].*

Yuriy Kuleshkov, Prof., Dsc., **Mykhailo Krasota**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Timofey Rudenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ruslan Osin**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **V. Kroshka**, master
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Strengthening of Aluminum Alloy Parts by Micro-Arc Oxidation

The purpose of the research is to analyze the scientific and technical information to determine the possibility of strengthening the parts of aluminum alloys by microarc oxidation, in particular gear pump housings.

The article presents the results of the analysis of possibility of using a new method of hardening robotic surfaces - micro-arc oxidation to enhance the wear resistance of working surfaces of parts made of aluminum alloys, in particular housings, gear pumps NSH. The paper describes the essence of the process of hardening parts by microarc oxidation, presents the main physical and mechanical characteristics of the hardening coating. It is noted that the adhesion strength and mechanical properties of the coating largely depend on the state of the surface to be strengthened, in particular, on the method of pretreatment. At the same time, it was found that the strengthening coating of the metal after plastic deformation has a greater adhesion strength, greater thickness and hardness. The paper presents the basic information about microarc oxidation, which, according to the authors, will contribute to the development of the method in the poorly studied method of hardening in repair production.

It can be concluded that the ceramic coatings obtained by microarc oxidation can be recommended for the restoration and strengthening of aluminum parts of gear pumps, in particular the pump housing.

microarc oxidation, hardening of aluminum alloys, plastic deformation, adhesion strength, wear resistance, microhardness of the coating, cermet

Одержано (Received) 24.01.2021

Прорецензовано (Reviewed) 05.02.2021

Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021