

С. А. Лещенко, канд. техн. наук, доцент, О. Ю. Бровін, канд. техн. наук,
С. Г. Дерібо, канд. техн. наук, доцент, І. Д. Мадика, магістр,
О. С. Водоріз, канд. фіз.-мат. наук, доцент

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЗНОСОСТІЙКОГО ХРОМУВАННЯ ВИСОКОКРЕМНИСТОГО СПЛАВУ АЛЮМІНІЮ

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

Ключові слова: технологія електрохімічних покриттів, гальванотехніка, висококремністий алюмінієвий сплав, зносостійке хромування, електроліт хромування, анодні матеріали, енергоефективність, фізика процесу, відновлення іонів хрому, швидкість осадження, вихід за струмом.

Вступ. Актуальність проблеми розроблення та вдосконалення технології хромування ливарних алюмінієвих сплавів останніми роками зростає у зв'язку зі збільшенням попиту на процеси отримання твердих зносостійких покриттів. Зносостійке хромування алюмінієвих сплавів є одним із ключових етапів технології виготовлення деталей двигунів внутрішнього згоряння, транспортних засобів та літальних апаратів, елементів гідравлічних і пневматичних систем, прецизійних деталей та приладів, штампів і пресформ тощо. До експлуатаційних характеристик зносостійких хромових покриттів висувають підвищені вимоги [1, 2, 3], що зумовлює необхідність постійного вдосконалення технології їхнього нанесення. Забезпечення довговічності хромових покриттів та виробів загалом неможливе без системного контролю якості на всіх стадіях технологічного процесу від попередньої підготовки поверхні до заключної термообробки, якщо така застосовується [4].

Щільні хромові покриття значної товщини відзначаються високою твердістю та зносостійкістю, тоді як мікротріщинуваті покриття здатні зменшувати коефіцієнт тертя завдяки утриманню мастильних матеріалів у мікротріщинах [5]. Тверді зносостійкі хромові покриття отримують виключно електрохімічним методом [6, 7], проте електролітичне осадження хрому має низку обмежень, пов'язаних зі складністю забезпечення рівномірної товщини шару на деталях складної геометрії через невисоку розсіювальну та покривну здатність електроліту [6, 7].

Однією з найважливіших умов під час осадження хрому на алюмінієві сплави є забезпечення високої адгезії покриття до основи [7]. Для цього особливу увагу слід приділити підготовці поверхні перед хромуванням. Відомо [8], що висококремністий сплав АК12М2МгН містить від 11 % до 13 % кремнію і від 1,5 % до 3 % міді, які істотно впливають на поведінку матеріалу в хімічних середовищах, проте у відкритій літературі відсутні дані щодо оптимальних методів підготовки поверхні саме цього сплаву до хромування.

Високі показники твердості, зносостійкості та стійкості до корозії поєднуються з можливістю формування покриттів товщиною понад 50 мкм, а в окремих випадках – до кількох сотень мікрометрів [5, 9]. Проте збільшення товщини покриття потребує підвищення тривалості процесу осадження, тому забезпечення високої продуктивності та енергоефективності процесу хромування є надзвичайно важливим.

Мета дослідження полягала у розробленні технологічного процесу, що забезпечує високопродуктивний та енергоефективний процес твердого зносостійкого хромування із високою адгезією до поверхні сплаву АК12М2МгН.

Завдання дослідження полягало у виборі технології підготовки поверхні сплаву АК12М2МгН, що забезпечить якісне зчеплення хромових покриттів з основою, і визначенні складу електроліту та режиму хромування, що забезпечить зносостійке хромування з високою продуктивністю та енергоефективністю.

Методика експерименту. Обробці піддавалися зразки, виготовлені з ливарного алюмінієвого сплаву АК12М2МгН з площею поверхні близько 2 дм².

Перед нанесенням хромового покриття проводили комплекс механічної та хімічної підготовки поверхні [2, 3]. Механічна обробка, спрямована на зменшення шорсткості та забезпечення необхідної чистоти поверхні, включала піскоструминну обробку з метою підвищення адгезії хромового покриття до основи, шліфування для формування рівномірної гладкої поверхні і хонінгування з метою створення мікрорельєфу, здатного утримувати мастило.

Метою хімічної підготовки було очищення поверхні від жирових забруднень, оксидних плівок і продуктів корозії. Дослідженнями встановлено, що чисту поверхню без ознак травлення алюмінієвої основи можна отримати при температурі 45–55 °С упродовж 10 хв. у розчині знежирення наступного складу, г/дм³: Na₂SiO₃ – 10–15, Na₅P₃O₁₀ – 6–10, КОН – 3–5, NaC₆H₁₁O₇ – 2–3, синтанол ДС-10 – 3–5.

Після промивання у теплій і холодній проточній воді здійснювалось дослідження різних розчинів хімічного травлення поверхні. Використання суміші концентрованих азотної та фторидної кислот при об'ємному співвідношенні HNO₃ : HF = 3 : 1 призводило до надмірного розтравлення поверхні сплаву. Розчин, який містив 150–200 г/дм³ H₃PO₄ і 35–45 г/дм³ NaF, виявився навпаки недостатньо активним і не забезпечував належного очищення поверхні. Рівномірного травлення з характерним освітленням поверхні вдалось досягти у розчині складу, г/дм³: HNO₃ – 400, HF – 100 при 15–30 °С упродовж 0,5–1 хв.

Спеціальна хімічна підготовка повинна створити умови для надійного зчеплення металевого покриття з підкладкою зі сплаву АК12М2МгН. Необхідність у спеціальній хімічній підготовці зумовлена наявністю на поверхні стійкої оксидної плівки, різко негативним електродним потенціалом алюмінію, його амфотерним характером, схильністю до утримання водню в мікропорах, а також значною різницею коефіцієнтів термічного розширення алюмінієвої основи та хромового покриття [6, 7, 10].

Цинкатна обробка проводилася при температурі 18–25 °С упродовж 6–15 с. у розчині складу, г/дм³: ZnO – 90–100, NaOH – 350–600, Na₂S – 0,5–5,0. Процес здійснювали дворазово з проміжним видаленням контактної осадової шару цинку шляхом травлення у розчині HNO₃ 450–470 г/дм³ при 18–25 °С впродовж 5–10 с.

Анодне оксидування здійснювали в розчині H₃PO₄ (ρ = 1,685 кг/дм³) 25–30 об.% при 18–25 °С, анодній густині струму 1,5 А/дм², напрузі 20–30 В протягом 10 хв.

Осадження хромових покриттів здійснювалось з таких електролітів, г/дм³:

- № 1 – розбавлений стандартний електроліт: CrO₃ – 150; H₂SO₄ – 1,5.
- № 2 – стандартний електроліт: CrO₃ – 250; H₂SO₄ – 2,5.
- № 3 – надсульфатний електроліт: CrO₃ – 250–300; H₂SO₄ – 8–10.
- № 4 – інноваційний каталізований електроліт: CrO₃ – 225–325; H₂SO₄ – 2,25–3,9; добавка Solar Catalyst 2100 – 3,5–4,5.

– № 5 – електроліт HEEF-25: CrO_3 – 235–265; H_2SO_4 – 3,2–4,5, Cr(III) < 8, добавка HEEF-25 MS – 260.

З метою забезпечення необхідного рівня експлуатаційної зносостійкості, товщина хромового покриття становила не менше 50 мкм [9]. Як нерозчинні аноди в електролітах хромування можуть застосовуватись аноди з чистого свинцю, свинцево-олов'яні (з вмістом олова 7–10 %), свинцево-сурм'яні (вміст сурми 6–10 %). Для промислового твердого та зносостійкого хромування в усіх зазначених електролітах були застосовані та добре себе проявили свинцево-олов'яні аноди, які виявили хімічну і механічну стійкість і забезпечили рівномірний розподіл струму завдяки утворенню стабільної електропровідної плівки PbO_2 .

Визначення катодного виходу за струмом (BC_k) здійснювали гравіметричним методом. Швидкість осадження розраховували за приростом товщини шару на одиницю часу.

Розробка технологічного процесу. В технології спеціальної обробки алюмінієвих сплавів можуть бути застосовані такі методи [6, 7, 11]: цинкатна обробка, анодне оксидування в ортофосфорній кислоті, хромування по тонкому підшару нікелю і безпосереднє хромування.

Цинкатна обробка. Результати досліджень показали, що після цинкатної обробки спостерігалось посереднє зчеплення хромового покриття з основою. Необхідність виконання короткотривалих операцій (до 15 с) призводило до великого відсотку браку та унеможлиблювало автоматизацію процесу. Значна кількість проміжних операцій, підвищені витрати води на промивання та великий обсяг стічних вод роблять таку технологічну схему малоефективною для промислового застосування.

Анодне оксидування в ортофосфорній кислоті реалізує інший підхід до спеціальної підготовки алюмінієвих сплавів, що полягає у формуванні анодно-оксидного шару. Відомо [6, 7, 11], що в результаті такої обробки утворюються анодно-оксидні покриття з порами конусоподібної форми діаметром близько 0,3 мкм, в яких повинно осаджуватись гальванічне покриття, що сприятиме збільшенню площі поверхні зчеплення покриття з основою. Експериментальні дослідження показали недостатню міцність адгезії хромового покриття при такому способі підготовки, що могло бути спричинено поганою покривною здатністю електроліту хромування. Крім того, в'язкий розчин ортофосфорної кислоти важко видаляється з пор утвореного анодно-оксидного шару, що призводить до появи дефектів і збільшення відсотка браку.

Попереднє нанесення тонкого підшару нікелю вважається одним із перспективних методів забезпечення надійного зчеплення хромових покриттів з алюмінієвими сплавами, він створює проміжний шар, який зменшує різницю потенціалів між пасивним хромовим покриттям та активною алюмінієвою поверхнею.

Рекомендована технологічна послідовність операцій включає такі етапи [7]:

1. Осадження тонкого шару нікелю з електроліту складу, г/дм^3 : $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 140–150, MgSO_4 – 70–80, NH_4Cl – 15, H_3BO_3 – 20. Режим осадження: $\text{pH} = 5,5\text{--}5,8$, температура 18–25 °С, катодна густина струму 2 А/дм^2 , тривалість 5 хв.
2. Уловлювання електроліту та промивання у проточній воді.
3. Термічна обробка при 100–120 °С протягом 20–30 хв.
4. Активація у 10 %-му розчині HCl тривалістю 3–5 с.
5. Проточне промивання.
6. Анодна обробка у 20 % розчині H_2SO_4 при $j_a = 10 \text{ А/дм}^2$ впродовж 15 с.
7. Промивання та прогрівання у гарячій воді.

8. Хромування.

Попри ефективність, зазначений спосіб є складним, тривалим і енергоємним, що обмежує можливість його застосування, особливо в умовах серійного виробництва.

Безпосереднє хромування алюмінієвих сплавів є найкоротшим варіантом технологічного процесу, рекомендований порядок операцій такий [6]:

1. Травлення у суміші концентрованих кислот $\text{HNO}_3 : \text{HF} = 1 : 5$ (за об'ємом).
2. Промивання проточною водою.
3. Прогрівання деталей у гарячій воді.
4. Хромування.

Недоліком даного методу є агресивність травильного розчину через значну концентрацію HF. Водночас суттєвою його перевагою є спрощена технологічна схема, істотно менша тривалість підготовки, менша ймовірність виникнення дефектів зчеплення. Проведені дослідження підтвердили ефективність такого методу для хромування сплаву АК12М2МгН, і саме цей метод рекомендований нами для подальшого використання.

Вибір та обґрунтування складу електроліту та режиму хромування. У промисловій практиці України найпоширенішими є стандартні, фторвмісні, надсульфатні та інші електроліти [12]. Останніми роками все ширше застосовують електроліти хромування з сучасними нефторидними каталізаторами [3, 9, 13, 14], зокрема Solar Catalyst 2100, Lunachrom, HV Catalyser, Hene-6000 Catalyst тощо.

Стандартний (сульфатний) електроліт є базовим для більшості типів хромових покриттів. Його основними компонентами є CrO_3 у концентрації 150–350 г/дм³ та H_2SO_4 у певному співвідношенні з вмістом хромової кислоти (найчастіше $\text{CrO}_3 : \text{H}_2\text{SO}_4 = 100 : 1$ [9]), яка виконує роль каталізатора відновлення Cr(VI) до металевого хрому. Співвідношення 80 : 1 сприяє утворенню більш гладких осадів, однак супроводжується зниженням розсіювальної та покривної здатності електроліту. У надсульфатних ваннах, де співвідношення $\text{CrO}_3 : \text{H}_2\text{SO}_4 \approx 30 : 1$, можливе швидке осадження товстих блискучих покриттів при температурі до 75 °С і густині струму до 100–300 А/дм², проте з низькою розсіювальною здатністю, що обмежує їх використання деталями простої геометрії. При співвідношенні $\text{CrO}_3 : \text{H}_2\text{SO}_4$ до $\approx 130 : 1$ розсіювальна здатність зростає, але швидкість відновлення хрому зменшується.

Фторидні (зокрема кремнефторидні) електроліти характеризуються низькою переваг порівняно із сульфатними. Вони дають змогу проводити процес при кімнатній температурі, мають кращу розсіювальну здатність, катодний вихід за струмом понад 20 % [9]. Типовий вміст хромової кислоти становить 175–400 г/дм³, а фторидного каталізатору у вигляді кремнефториду $\text{SiF}_6^{2-} - 2-3$ г/дм³.

Однак фторидні ванни мають низку обмежень. Вони сприяють хімічному підтравлюванню ділянок основи з низькою катодною густиною струму, що призводить до забруднення електроліту продуктами розчинення металу основи. Такі електроліти є агресивнішими, на свинцевих анодах утворюється плівка фторидів з високим електричним опором. Покриття з фторидних електролітів зазвичай мають нижчу твердість і більшу пластичність порівняно з осадами зі стандартних сульфатних ванн.

Останнім часом активно розвивається застосування нефторидних високошвидкісних електролітів, в яких використовуються запатентовані вторинні каталізатори. Такі системи забезпечують формування хромових покриттів із максимальною зносостійкістю та корозійною стійкістю [9]. Процес проводять при 55–60 °С з катодним виходом за струмом понад 20 %. Відсутність фторидів у складі таких електролітів зменшує їхню

агресивність і виключає необхідність футерування сталевих ванн. Проте в літературі немає інформації про застосування таких електролітів для хромування саме алюмінієвих сплавів.

Дослідження енергоефективності і продуктивності електролітів хромування. Продуктивність та енергоефективність процесу хромування визначаються катодною густиною струму і виходом за струмом реакції одержання металевих хрому.

Метою цього етапу дослідження було визначення максимальної катодної густини струму, при якій можливе осадження хромових покриттів з заданими властивостями, а також залежності виходу за струмом реакції відновлення хрому від катодної густини струму і температури.

В стандартному електроліті № 1 було зафіксовано найвище значення катодного виходу за струмом $BC_k = 18\%$ при температурі $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ і катодній густині струму 90 А/дм^2 . При цьому швидкість осадження становила 90 мкм/год .

Згідно з даними наукових досліджень [7], надсульфатний електроліт № 3, який характеризується підвищеним вмістом сульфат-іонів і низькою розсіювальною здатністю, повинен забезпечувати катодний вихід за струмом $22\text{--}24\%$ при температурі $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ і катодній густині струму $180\text{--}200\text{ А/дм}^2$. Проте експериментальні результати, отримані на досліджуваному сплаві, виявились дещо іншими (рис. 1). На основі цих даних побудовано залежність швидкості осадження хрому від катодної густини струму та температури (рис. 2). Установлено, що при температурі понад $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ та густині струму понад 200 А/дм^2 різко зменшується розсіювальна й покривна здатність електроліту № 3, що обмежує застосування таких режимів.

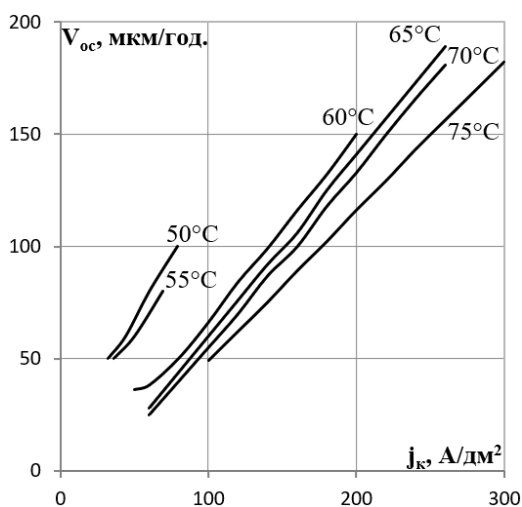


Рисунок 1 – Залежність катодного виходу за струмом у надсульфатному електроліті № 3 від катодної густини струму і температури

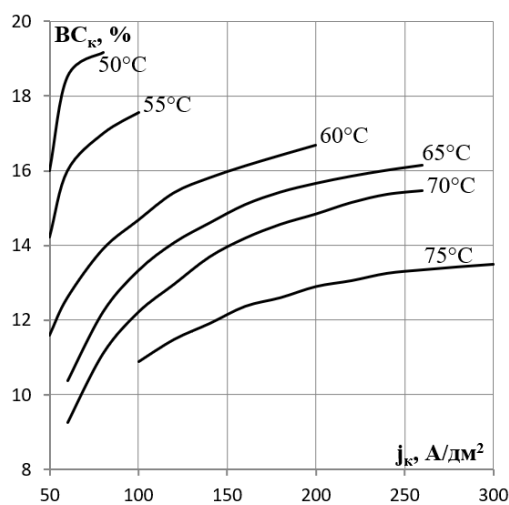


Рисунок 2 – Залежність швидкості осадження хрому з надсульфатного електроліту № 3 від катодної густини струму і температури

Попри це, при температурі $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ і катодній густині струму 200 А/дм^2 швидкість осадження хрому з електроліту № 3 досягала 150 мкм/год при виході за струмом $16,7\%$. Таким чином, надсульфатний електроліт продемонстрував вищу продуктивність, ніж стандартний, однак поступається за стабільністю процесу та рівномірністю покриття, особливо на деталях складної конфігурації.

Електроліт № 4 характеризується покращеною розсіювальною здатністю і стабільністю при низьких густинах струму. Випробування показали кращу зносостійкість

покриттів, одержаних з електроліту № 4, що пояснюється формуванням мікропористої структури, яка сприяє утриманню мастильних матеріалів та зниженню коефіцієнта тертя. Питомі витрати добавки Solar Catalyst 2100 становлять близько $0,8 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{мкм})$ нанесеного покриття, що свідчить про економічність її використання у виробничих умовах.

Використання добавки Solar Catalyst 2100 у складі електроліту № 4 сприяло досягненню кращої продуктивності (рис. 3) та більшого катодного виходу за струмом (рис. 4) у порівнянні зі стандартним електролітом № 2.

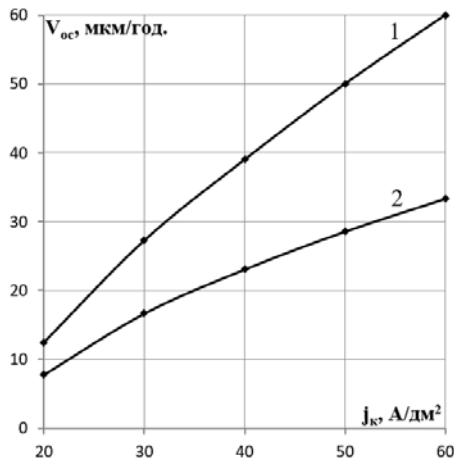


Рисунок 3 – Продуктивність процесу хромування: 1 – в електроліті № 4; 2 – в електроліті № 2

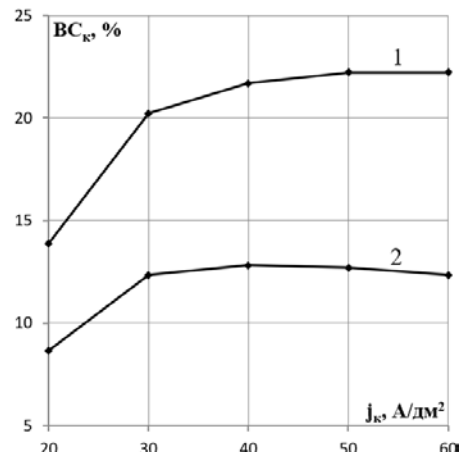


Рисунок 4 – Катодний вихід за струмом: 1 – в електроліті № 4; 2 – в електроліті № 2

Електроліт № 5 забезпечує осадження твердого зносостійкого хрому при температурі від 20 до 60 °С (оптимально – при 55–60 °С) і густині струму від 20 до 60 А/дм² [13]. Представлені на наступних рисунках залежності свідчать про перевагу електроліту № 5 перед стандартним електролітом № 2 як за енергоефективністю (виходом за струмом, див. рис. 5), так і за продуктивністю (швидкістю осаду, див. рис. 6).

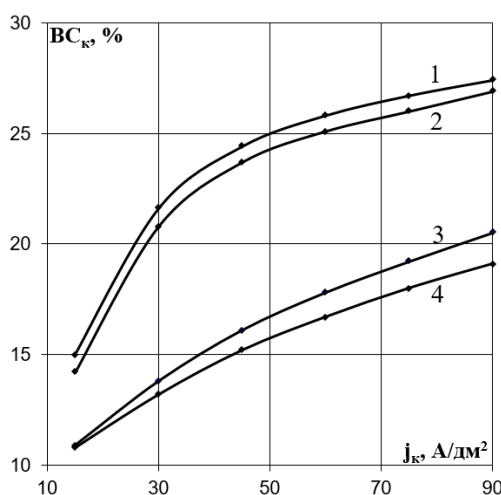


Рисунок 5 – Катодний вихід за струмом: 1, 2 – в електроліті № 5; 3, 4 – в електроліті № 2, 1, 3 – при 55 °С, 2, 4 – при 60 °С

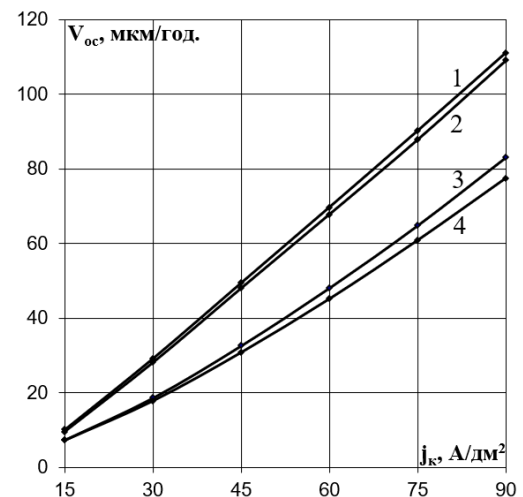


Рисунок 6 – Продуктивність хромування: 1, 2 – в електроліті № 5; 3, 4 – в електроліті № 2, 1, 3 – при 55 °С, 2, 4 – при 60 °С

Висновки

1. Встановлено, що безпосереднє хромування поверхні сплаву АК12М2МгН після хімічного знежирення і травлення у суміші $\text{HNO}_3 : \text{HF} = 1 : 5$ (об.) є обґрунтованою технологією, здатною забезпечити якісне зчеплення хромових покриттів з основою.

2. У розбавленому стандартному електроліті хромування № 1 при $T = 60^\circ\text{C}$ і $j_k = 90 \text{ А/дм}^2$ досягнуто продуктивності 90 мкм/год. при катодному виході за струмом $\text{BC}_k = 18\%$.

3. У надсульфатному електроліті № 3 найбільшій швидкості осадження хромового покриття із заданими властивостями досягнуто при $T = 60^\circ\text{C}$ і $j_k = 200 \text{ А/дм}^2$, вона складає 150 мкм/год. Але нестабільність електроліту та нерівномірність покриття по товщині обмежує його використання деталями простої конфігурації.

4. Використання каталізатора Solar Catalyst 2100 у складі електроліту № 4 дозволяє досягти катодного виходу за струмом близько 22 %, при густині струму 60 А/дм^2 досягнута швидкість хромування лише 60 мкм/год., але покриття має суттєво вищу зносостійкість, рівномірність по товщині, мікропористу структуру, яка сприяє утриманню мастильних матеріалів та зниженню коефіцієнта тертя.

5. В електроліті № 5 також одержано покриття з підвищеною твердістю, зносостійкістю, мікропористою структурою, при $T = 60^\circ\text{C}$, $j_k = 90 \text{ А/дм}^2$ катодний вихід за струмом досягає 27 %, а швидкість осадження 110 мкм/год.

Співставлення швидкості осадження з якісними характеристиками покриттів свідчить про переваги і доцільність використання електроліту № 5, тобто процесу HEEF-25.

Література

1. Hard Chrome Plating. URL: <https://hcsplating.com/finishes/hard-chrome-plating>.
2. Important Considerations In Hard Chromium Plating. *Plating & Surface Finishing*. April 2002. URL: <https://www.nmfrc.org/pdf/psf2002/040210.pdf>.
3. Eric Svenson. DuraChrome Hard Chromium Plating. *Plating Resources*, Inc. Cocoa, Florida, USA 1980, 2006. URL: <https://plating.com/wp-content/uploads/2022/03/DuraChrome.pdf>.
4. Посувайло В. М. Порівняння методів поверхневого зміцнення деталей машин покриттями. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2021. № 4. С. 83-97. DOI: <https://doi.org/10.24025/2306-4412.4.2021.253298>.
5. Sohi M. H., Kashi A., Hadavi S. M. Comparative tribological study of hard and crack-free electrodeposited chromium coatings. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. No. 138(1-3), P. 219-222. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092401360300075X>.
6. Якименко Г. Я. Гальванічні покриття. Аспекти вибору, функціональні властивості і технологія одержання : навч. посіб. Харків : НТУ «ХПІ», 2009. 148 с.
7. Якименко Г. Я., Артеменко В. М. Технічна електрохімія. Ч.3. Гальванічні виробництва: Підручник / за ред. Б. І. Байрачного. Харків : НТУ «ХПІ». 2006. 272 с.
8. ДСТУ 2839-94. Сплави алюмінієві ливарні. Технічні умови. Київ : Держстандарт України. 1995. 44 с. Дійсний з 31.10.1994 р.
9. Kenneth R. Newby. Functional Chromium Plating. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/002605769593368C>.

10. John Bibber. Zincate- or Stannate-Free Plating of Aluminum and its Alloys. *Metal Finishing*. 2013. Vol. 111, iss. 1. P. 23–25. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(13\)70173-9](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(13)70173-9).
11. Сучасні технології функціональної обробки поверхні. Лабораторний практикум : навч. посіб.; уклад.: О. В. Косогін, М. В. Бик, Д. Ю. Ущаповський. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2025. 71 с.
12. Слюсар М. А. Сучасні електроліти та методи хромування. *Технології та дизайн*. 2019. № 3(32). URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2019_3_12.
13. HEEF 25. Chromium plating process. URL: <https://www.scribd.com/document/926713806/Heef-25>.
14. HENE 6000 catalyst. A unique non fluoride catalyst for high speed chromium plating. URL: <https://www.primechemicals.com.pk/data-sheets/HENE-6000-catalyst-data-sheet.pdf>.

Bibliography (transliterated)

1. Hard Chrome Plating. URL: <https://hcsplating.com/finishes/hard-chrome-plating>.
2. Important Considerations In Hard Chromium Plating. *Plating & Surface Finishing*. April 2002. URL: <https://www.nmfr.org/pdf/psf2002/040210.pdf>.
3. Eric Svenson. DuraChrome Hard Chromium Plating. *Plating Resources*, Inc. Cocoa, Florida, USA 1980, 2006. URL: <https://plating.com/wp-content/uploads/2022/03/DuraChrome.pdf>.
4. Posuvailo V. M. Porivniannia metodiv poverkhnevoho zmitsnennia detalei mashyn pokryttiamy. *Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu*. 2021. № 4. P. 83–97. DOI: <https://doi.org/10.24025/2306-4412.4.2021.253298>.
5. Sohi M. H., Kashi A., Hadavi S. M. Comparative tribological study of hard and crack-free electrodeposited chromium coatings. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. No. 138(1-3), P. 219–222. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092401360300075X>.
6. Yakymenko H. Ya. Halvanichni pokryttia. Aspekty vyboru, funktsionalni vlasty?vosti i tekhnolohiia oderzhannia : navch. posib. Kharkiv : NTU «KhPI». 2009. 148 p.
7. Yakymenko H. Ya., Artemenko V. M. Tekhnichna elektrokhimia. Ch.3. Halvanichni vyrobnytstva: Pidruchnyk / za red. B. I. Bairachnoho. Kharkiv : NTU «KhPI». 2006. 272 p.
8. DSTU 2839-94. Splavy aliuminiievi lyvarni. Tekhnichni umovy. Kyiv : Derzh?tandart Ukrainy. 1995. 44 p. Diisnyi z 31.10.1994 r.
9. Kenneth R. Newby. Functional Chromium Plating. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002605769593368C>.
10. John Bibber. Zincate- or Stannate-Free Plating of Aluminum and its Alloys. *Metal Finishing*. 2013. Vol. 111, iss. 1. P. 23–25. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(13\)70173-9](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(13)70173-9).
11. Suchasni tekhnolohii funktsionalnoi obrobky poverkhni. Laboratornyi praktykum : navch. posib.; uklad.: O. V. Kosohin, M. V. Byk, D. Yu. Ushchapovskyi. Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho. 2025. 71 p.
12. Sliusar M. A. Suchasni elektrolity ta metody khromuvannia. *Tekhnolohii ta dyzain*. 2019. № 3(32). URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2019_3_12.
13. HEEF 25. Chromium plating process. URL: <https://www.scribd.com/document/926713806/Heef-25>.

14. HENE 6000 catalyst. A unique non fluoride catalyst for high speed chromium plating. URL: <https://www.primechemicals.com.pk/data-sheets/HENE-6000-catalyst-data-sheet.pdf>.

УДК 621.357

С. А. Лещенко, канд. техн. наук, доцент, О. Ю. Бровін, канд. техн. наук,
С. Г. Дерібо, канд. техн. наук, доцент, І. Д. Мадика, магістр,
О. С. Водоріз, канд. фіз.-мат. наук, доцент

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЗНОСОСТІЙКОГО ХРОМУВАННЯ ВИСОКОКРЕМНИСТОГО СПЛАВУ АЛЮМІНІЮ

У роботі представлено результати дослідження технологічних особливостей процесу твердого зносостійкого хромування деталей, виготовлених із висококремнистого алюмінієвого сплаву АК12М2МгН. Для формування мікрорельєфу і забезпечення надійного зчеплення покриття запропоновано застосування піскоструминної обробки, шліфування та хонінгування. Встановлено, що використання традиційних методів спеціальної підготовки (цинкатної обробки, анодування в ортофосфорній кислоті або нанесення підшару нікелю) для поставленої задачі є недоцільним через ускладнення технологічної схеми та погіршення адгезії. Запропоновано схему підготовки поверхні, що передбачає хімічне знежирення, травлення в суміші концентрованих кислот H^+/NO_3^- : $\text{HF} = 1 : 5$ та безпосереднє хромування.

Експериментально досліджено енергоефективність та продуктивність стандартних (розбавлених і середньоконцентрованих), надсульфатних, а також сучасних електролітів з добавками Solar Catalyst 2100 і HEEF-25.

У розбавленому стандартному електроліті при температурі 60 °С досягнуто швидкості осадження 90 мкм/год. при катодному виході за струмом 18 %. У надсульфатному електроліті, з огляду на його низьку розсіювальну здатність, рекомендовано обмежити температуру до 60 °С і катодну густину струму до 200 А/дм². За цих параметрів швидкість осадження становила 150 мкм/год., а катодний вихід за струмом склав 16,7 %.

Використання електроліту з добавкою Solar Catalyst 2100 забезпечило катодний вихід за струмом до 22 % та формування мікропористої структури покриття. Незважаючи на нижчу швидкість осадження (60 мкм/год.), покриття характеризуються підвищеною зносостійкістю та кращою розсіювальною здатністю.

В електроліті HEEF-25 одержано покриття з підвищеною твердістю, зносостійкістю та мікропористою структурою. За температури 60 °С і густини струму 90 А/дм² катодний вихід за струмом досягав 27 %, а швидкість хромування – 110 мкм/год.

Отримані результати свідчать про доцільність застосування електроліту HEEF-25 для зносостійкого хромування висококремнистого алюмінієвого сплаву АК12М2МгН.

Ключові слова: технологія електрохімічних покриттів, гальванотехніка, висококремністий алюмінієвий сплав, зносостійке хромування, електроліт хромування, анодні матеріали, енергоефективність, фізика процесу, відновлення іонів хрому, швидкість осадження, вихід за струмом.

S. A. Leshchenko, O. Yu. Brovin, S. H. Deribo, I. D. Madyka, O. S. Vodoriz

RESEARCH ON THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF WEAR-RESISTANT CHROMIUM PLATING OF HIGH-SILICON ALUMINUM ALLOYS

The paper presents the results of a study of the technological features of the process of hard wear-resistant chromium plating of parts made of high-silicon aluminum alloy. To form micro-relief and ensure reliable adhesion of the coating, it is proposed to use sandblasting, grinding, and honing. It has been established that the use of traditional methods of special preparation (zincate treatment, anodizing in orthophosphoric acid, or applying a nickel under-layer) for the task at hand is impractical due to the complexity of the technological scheme and poor adhesion. It is proposed that the surface preparation scheme should consist of chemical degreasing, etching in a mixture of concentrated acids $\text{HNO}_3 : \text{HF} = 1 : 5$, and direct chromium plating.

The energy efficiency and productivity of standard (diluted and medium-concentration), supersulfate, and modern electrolytes with Solar Catalyst 2100 and HEEF-25 additives were experimentally investigated.

In diluted standard electrolyte at a temperature of 60 °C, a deposition rate of 90 $\mu\text{m/h}$ was achieved with a cathode current efficiency of 18 %. In supersulfate electrolyte, given its low throwing power, it is recommended to limit the temperature to 60 °C and the cathode current density to 200 A/dm^2 . Under these parameters, the deposition rate was 150 $\mu\text{m/h}$, and the cathode current efficiency was 16.7 %.

The use of electrolyte with Solar Catalyst 2100 additive provided a cathode current efficiency of up to 22 % and the formation of a microporous coating structure. Despite the lower deposition rate (60 $\mu\text{m/h}$), the coatings are characterized by increased wear resistance and better throwing power.

The HEEF-25 electrolyte also produced a coating with increased hardness, wear resistance, and a microporous structure. At a temperature of 60 °C and a current density of 90 A/dm^2 , the cathode current efficiency reached 27 %, and the chromium plating rate was 110 $\mu\text{m/h}$.

The results obtained indicate the feasibility of using HEEF-25 electrolyte for wear-resistant chromium plating of high-silicon aluminum alloy.

Keywords: electrochemical coating technology, electroplating, high-silicon aluminum alloy, wear-resistant chrome plating, electrolytic chrome plating, anode materials, energy efficiency, process physics, chromium ion reduction, deposition rate, current output.