



УКРАЇНА

(19) UA (11) 92430 (13) C2
(51) МПК (2009)
C25D 3/56
C25D 5/10
C25D 7/00
C25D 3/02

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) СПОСІБ ЕЛЕКТРООСАДЖЕННЯ НІКЕЛЬ-МІДНОГО ПОКРИТТЯ НА МАГНІТ NdFeB

1

(21) a200912231
(22) 27.11.2009
(24) 25.10.2010
(46) 25.10.2010, Бюл.№ 20, 2010 р.
(72) МАЙЗЕЛІС АНТОНІНА ОЛЕКСАНДРІВНА,
БАЙРАЧНИЙ БОРИС ІВАНОВИЧ, ТРУБНИКОВА
ЛАРИСА ВАЛЕНТИНІВНА, ДЕВІЗЕНКО ОЛЕКСАНДР
ЮРІЙОВИЧ
(73) НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"
(56) UA 28023 U 26.11.2007
RU 2349686 C1 20.03.2009
DE 102005040151 A1 01.03.2007
JP 2200799 A 09.08.1990
CN 101373651 A 25.02.2009
GB 1059391 22.02.1967

2

(57) Спосіб електроосадження нікель-мідного покриття на магніт NdFeB з розчинів, що містять іони міді, нікелю і сполуки фосфору та амонію, який відрізняється тим, що нікель-мідне покриття осаджують у вигляді мультишарового покриття (Cu-Ni)/(Ni-Cu) з електроліту, що містить іони нікелю і міді у співвідношенні $[Ni^{2+}]:[Cu^{2+}]=2\div 10$, сполуки фосфору та іони амонію - у вигляді амонію пірофосфорнокислого з концентрацією 180-450г/дм³, амонію хлориду і амонію гідроксиду з концентрацією 4-5г/дм³ до рН 8,2-8,7, при періодичній зміні густини струму від $J_1=20-70A/m^2$ протягом $t_1=50-90c$ до $J_2=50-200A/m^2$ протягом $t_2=20-50c$, на підшар, що наносять у розчині ванни уловлювання цього електроліту при рН розчину 9,0-9,5 і концентрації $[Cu^{2+}]$ менш ніж 1г/дм³, а $[Ni^{2+}]$ більш ніж 3г/дм³.

Винахід відноситься до області гальваностегії, зокрема, до нанесення багатшарових покриттів, що містять шари міді й нікелю (або сплавів), на рідкоземельні магніти, наприклад, NdFeB, які одержують із порошків неодиму (Nd), заліза (Fe) і бора (B), для надання їм корозійної стійкості й поліпшення механічних властивостей поверхні.

Магніти NdFeB мають гарні магнітні властивості, але одночасно крихкі й корозійно нестійкі, особливо в середовищі з підвищеною вологістю. Відомі фізичні, хімічні й електрохімічні способи осаження покриттів різними металами на магніти, що захищають їх від корозії й механічних пошкоджень. Складність нанесення покриттів пов'язана з високою електронегативністю основи (через наявність у ній неодиму) і неоднорідністю поверхні (як через порошкову природу матеріалу, так і через його багатокомпонентність).

Як зовнішній шар найбільш широке поширення знайшли покриття нікелем, оскільки вони відносно недорогі, мають гарні механічні властивості, не сприяють конденсації вологи на поверхні й при

товщині, достатньої для перекидання пор, захищають магніт від корозії. Для підвищення мікротвердості поверхні покриття нікелем заміняють сплавом нікелю з фосфором, що наносять хімічним способом. Хімічні способи дозволяють одержувати рівномірні по товщині покриття, але міцність зчеплення з основою більш висока у гальванічних покриттів.

При збільшенні товщини нікелевого покриття ростуть напруги, погіршується зчеплення з основою й захисні властивості покриттів. Кращі механічні властивості нікелевого шару при збільшенні його товщини забезпечує підшар міді. Однак через значну різницю потенціалів міді й магніту NdFeB при нанесенні мідного покриття з'являється небезпека контактного витиснення міді поверхню магніту навіть із комплексного пірофосфатного електроліту, що порушує зчеплення мідного шару з основою. Поряд з токсичним ціаністим електролітом для кращого зчеплення з основою мідь наносять із електроліту, що містить органічну фосфор-

(13) C2

(11) 92430

(19) UA

ну кислоту, глюконову кислоту, а також одну з органічних карбонових кислот [1].

Іншим варіантом поліпшення зчеплення з основою є осадження тонкого нікелевого шару під мідний шар. Наприклад, гарні антикорозійні властивості забезпечує спосіб, що пропонує наносити нікелевий підшар, шар міді з пірофосфатного електроліту й шар нікелю [2].

Однак ці способи не забезпечують достатні для деяких областей застосування магнітів механічні властивості, такі як стійкість до стирання й ударних навантажень, тобто високу мікротвердість покриттів без погіршення їхньої пластичності й зниження ударної в'язкості.

Найбільш близьким технічним рішенням є спосіб [3], за яким на поверхню постійного R-Fe-B (R-рідкоземельний елемент, наприклад, неодим) магніту наносять тришарове покриття, що складається із шару електролітичного нікелю товщиною 3-15 мкм як перший шар, шару електролітичної міді або олова товщиною 3-15 мкм як другий шар і покриття нікель-фосфор, що осаджений хімічним способом, товщиною 4-7 мкм як третій шар. Перший шар наносять із електроліту, що містить сульфат нікелю, цитрат амонію й/або натрію, борну кислоту, нашатир (хлорид амонію) і/або сульфат натрію, добавку для зняття напруг, при рН 6,0-8,0 і температурі 40-60°C. Другий шар - з пірофосфатного електроліту міднення, що містить аміачну воду й агент, що освітляє, при рН 8,0-9,0 і температурі 50-60°C. Третій шар наносять хімічно з розчину, що містить сульфат нікелю, гіпофосфіт натрію, стабілізатор, комплексоутворювач, при рН 4,0-5,0 і температурі 80-95°C. Третій шар, що містить 5-12% фосфору, має твердість по Віккерсу від 400 до 700 МПа, що в 2,5-4,5 разів більше, ніж твердість другого (мідь або олово) шару. Загальна товщина шарів становить 15-25 мкм.

Спосіб дозволяє одержувати покриття, що одночасно має корозійну стійкість при загальній товщині шарів 15-25 мкм, гарний опір стиранню й удароміцність. Однак технологічний процес містить велику кількість операцій для нанесення трьох шарів покриттів, при меншій товщині шарів погіршуються корозійні властивості, а для нанесення необхідної товщини потрібний тривалий час. Всі розчини працюють із підігрівом, що здорожує процес і погіршує магнітні характеристики матеріалу. При функціонуванні розчину для хімічного осадження сплаву нікель-фосфор витрачається сіль нікелю й гіпофосфіт натрію, розчин необхідно постійно коректувати. Після певної кількості операцій коректування його необхідно регенерувати або знешкоджувати перед зливом у стічні води. Крім того, після нанесення кожного із трьох шарів необхідне ретельне промивання деталей. Промивні води після всіх процесів знешкоджують, вилучають метали у вигляді шламу станцій нейтралізації, або в складі елюату іонобмінних установок, або продукту електрохімічної обробки та ін.

Задачею, що розв'язується даним винаходом, є скорочення кількості операцій, зниження витрати води, матеріалів й енергоспоживання за рахунок осадження шарів, що містять мідь і нікель, в одному електроліті у вигляді мультишарового покриття

(Cu-Ni)/(Ni-Cu), а також сполучення операцій осадження підшару (першого шару) і вилучення металів з ванни уловлювання цього електроліту.

В основу винаходу покладена задача створення способу електроосадження нікель-мідного покриття на магніт NdFeB з розчинів, що містять іони міді, нікелю і сполуки фосфору та амонію.

Для рішення поставленої задачі запропонований спосіб, за яким нікель-мідне покриття осаджують у вигляді мультишарового покриття (Cu-Ni)/(Ni-Cu) з електроліту, що включає іони нікелю і міді у співвідношенні $[Ni^{2+}]:[Cu^{2+}]=2 \div 10$, сполуки фосфору та іони амонію у вигляді 180-450 г/дм³ амонію пірофосфорнокислого, 4-5 г/дм³ амонію хлориду й амонію гідроксиду до рН 8,2-8,7, при періодичній зміні густини струму від $J_1=20-70 \text{ A/m}^2$ протягом $t_1=50-90 \text{ c}$ до $J_2=50-200 \text{ A/m}^2$ протягом $t_2=20-50 \text{ c}$, на підшар, що наносять у розчині ванни уловлювання цього електроліту при рН розчину 9,0-9,5 і концентрації $[Cu^{2+}]$ менш ніж 1 г/дм³, а $[Ni^{2+}]$ більш ніж 3 г/дм³.

Процес здійснюють у такий спосіб.

Підготовлені деталі з магніту NdFeB завантажують у ванну уловлювання основного електроліту, у якій підтримують концентрацію іонів міді менш ніж 1 г/дм³, іонів нікелю - більш ніж 3 г/дм³, рН 9,0-9,5 при вмісті інших компонентів основного електроліту, які уловилися у ванні уловлювання, у концентрації 10-30% від їхнього вмісту в електроліті. Температура кімнатна. Наносять 1-2 мкм покриття сплавом нікель-мідь при катодній густині струму 30-50 А/м² і накладенні перемішування. Аноди нерозчинні, у контейнерах з діафрагмою. Потім деталі без промивання переносять в основну ванну, у якій перебуває електроліт, що містить сумарну концентрацію іонів нікелю і міді у співвідношенні $[Ni^{2+}]:[Cu^{2+}]=2 \div 10$, 180-450 г/дм³ амонію пірофосфорнокислого, 4-5 г/дм³ амонію хлориду й амонію гідроксиду до рН 8,2-8,7. Наносять 9-13 мкм мультишарового покриття (Cu-Ni)/(Ni-Cu), що складає із шарів сплавів мідь-нікель і нікель-мідь при накладенні перемішування й періодичній зміні густини струму від $J_1=20-70 \text{ A/m}^2$ протягом $t_1=50-90 \text{ c}$ до $J_2=50-200 \text{ A/m}^2$ протягом $t_2=20-50 \text{ c}$. Після нанесення покриття деталі промивають у ванні уловлювання основного електроліту, тобто, у ванні для нанесення підшару, і у ваннах промивання.

При виконанні сукупності зазначених операцій експериментально виявлено, що умови електролізу, що створилися, при нанесенні нікель-мідного підшару з розчину ванни уловлювання (підтримка концентрації іонів міді не більше 1 г/дм³, а іонів нікелю не менш 3 г/дм³, при рН 9,0-9,5, у присутності надлишку іонів амонію й пірофосфату, які виносяться з основної ванни при промиванні), у сполученні з можливістю осаджувати шари без проміжних промивань, дозволяють забезпечити відмінне зчеплення покриття з електронегативною основою магніту NdFeB, а умови електролізу в основній ванні, що включає іони металів у співвідношенні $[Ni^{2+}]:[Cu^{2+}]=2 \div 10$, сполуки фосфору та іони амонію у вигляді 180-450 г/дм³ амонію пірофосфорнокислого, 4-5 г/дм³ амонію хлориду й амонію гідроксиду до рН 8,2-8,7 (при періодичній зміні

густини струму від $J_1=20-70\text{A}/\text{m}^2$ протягом $t_1=50-90\text{с.}$ до $J_2=50-200\text{A}/\text{m}^2$ протягом $t_2=20-50\text{с.}$), у сполученні з можливістю осаджувати шари без перевищення струму й без проміжних промивань, завдяки формуванню покриття з дрібнокристалевою структурою й чергуванню шарів різного складу забезпечує високий опір стиранню (за рахунок шаруватості, утворення міжфазних сполук й, можливо, включення фосфору в покриття) і удароміцність без втрати пластичності (як за рахунок малої товщини мультишарів так і за рахунок наявності міді в сплавах з нікелем), відмінний опір покриття корозії (за рахунок перекидання пор шарами корозійностійких сплавів товщиною 40-100нм), що дозволяє в 1,5 рази зменшувати товщину покриття, а значить і витрати анодів робочої ванни, а також у меншому ступені збільшувати розміри магніту.

Ідентичність компонентів електроліту для нанесення підшару й основної ванни, а також можливість наносити шари сплавів різного складу в одній ванні без проміжних промивань, крім зменшення ризику окислювання поверхні між операціями, приводить до зменшення кількості операцій, витрат води, втрат хімікатів. Зниження витрат води й матеріалів відбувається за рахунок меншої кількості промивань і меншої концентрації іонів металів у розчині, що виноситься у систему промивних ванн, за рахунок зменшення об'єму стоку, що потребує доочищення, зменшення витрат на поповнення вмісту гіпофосфіту й солей нікелю в розчині для хімічного нікелювання, а також на його регенерацію. Крім того, осадження покриттів при кімнатній температурі дозволяє відмовитися від енергоємних операцій підігріву електролітів, зберігає магнітні властивості деталей з NdFeB.

У технічному плані відмінною рисою пропонованого винаходу є те, що

- на магніти наносять мультишарове покриття, тобто, покриття, що містить на порядок більшу кількість шарів, чим прийняте в гальванічному виробництві багатшарове (3 шари, як й у способі-прототипі);

- мідь і нікель є в покритті у вигляді сплавів мідь-нікель і нікель-мідь, а не у вигляді нікелю, міді й сплаву нікель-фосфор;

- осадження покриття роблять у дві стадії, а не в три;

- електроліт для осадження мультишарового покриття містить сполуки фосфору й іони амонію у вигляді амонію пірофосфорнокислого, а не у вигляді гіпофосфіта й відомих солей амонію або калію (натрію) пірофосфорнокислого;

- шари покриття наносять без проміжних промивань, з утилізацією металів, що виносяться у промивні води, у робочому процесі, а не з виводом компонентів всіх трьох робочих розчинів у промивні води; без використання розчину для хімічного нікелювання.

Відомі способи нанесення мультишарових мідно-нікелевих покриттів із цитратного електроліту з використанням імпульсного режиму електролізу, у процесі якого осаджуються шари товщиною декілька нм. Однак вони не дозволяють одержувати покриття, що мають високу твердість.

Відомі амікатні й пірофосфатні (у тому числі й що містять іони амонію, але при співвідношенні концентрації іонів амонію й пірофосфата меншому, чим у пропонованому способі), електроліти для осадження сплавів нікель-мідь [4]. Однак і покриття, що осаджені на постійному струмі, і що отримані з використанням імпульсних режимів з одержанням істотно більш тонких шарів, що не перекиваються, не мають високу твердість.

Відомий спосіб осадження підшару, що містить мідь і нікель, з ванни уловлювання електролітів міднення й нікелювання [5]. Цей спосіб дозволяє заощаджувати метали за рахунок сполучення операції вилучення металів зі сполученої ванни уловлювання сірчаноокислих електролітів міднення й нікелювання й операції нанесення підшару. Однак у відомому способі не можна переносити деталі після осадження підшару без промивання у ванну для нанесення робочого покриття, тому що присутність іонів амонію в сірчаноокислих електролітах міднення й нікелювання небажано. У пропонованому способі ідентичність компонентів основної ванни й ванни вловлювання, у якій наноситься підшар, дозволяє переносити деталі в основну ванну без промивання, що забезпечує зниження витрати води й хімікатів і зменшує ризик окислювання поверхні деталей. Крім того, відомий спосіб дозволяє осаджувати покриття, що має міцне зчеплення тільки зі сталеву основою. У пропонованому розчині ванни уловлювання є надлишок іонів амонію й пірофосфату, що створює умови осадження покриття, які відрізняються від відомих. З основою із магніту NdFeB, що є більш електронегативною, чим сталева основа, міцне зчеплення досягається тільки при спільній присутності цих іонів завдяки осадженню покриття при більш негативних потенціалах.

При збільшенні співвідношення $[\text{Ni}^{2+}]:[\text{Cu}^{2+}]$ більш 10 погіршується якість мідно-нікелевих шарів мультишарового покриття, а при зменшенні цього співвідношення менш 2 - погіршується якість нікель-мідних шарів, що в обох випадках приводить до погіршення властивостей усього покриття: знижується його мікротвердість, корозійна стійкість.

Використання сполук, що містять фосфор та іони амонію в концентраціях амонію пірофосфорнокислого більш ніж $450\text{г}/\text{дм}^3$, хлориду амонію більше $5\text{г}/\text{дм}^3$ і гідроксида амонію до рН більше 8,7, приводить до зниження катодного виходу за струмом, а використання цих компонентів у концентраціях амонію пірофосфорнокислого менш ніж $180\text{г}/\text{дм}^3$, хлориду амонію менш ніж $4\text{г}/\text{дм}^3$ і гідроксида амонію до рН менш 8,2 не дозволяє забезпечити хімічну стабільність електроліту.

Використання густини струму за межами значень діапазонів $J_1=20-70\text{A}/\text{m}^2$ (протягом $t_1=50-90\text{с.}$) до $J_2=50-200\text{A}/\text{m}^2$ (протягом $t_2=20-50\text{с.}$) не дозволяє одержувати корозійностійке покриття, що має мікротвердість вище 400Мпа. Осадження шарів протягом часу менш 50с. при густині струму $20-70\text{A}/\text{m}^2$ і менш 20с при $50-200\text{A}/\text{m}^2$ не дозволяє одержувати суцільних шарів мідно-нікелевих і нікель-мідних сплавів, що приводить до зниження корозійної стійкості покриттів. Осадження шарів

протягом часу більше 90с. при густині струму 20-70А/м² і більше 20с. при 50-200А/м² приводить до одержання більш пухких шарів, що не забезпечують необхідні механічні властивості покриття.

При збільшенні вмісту іонів міді вище 1г/дм³ і зниженні концентрації нікелю менш 3г/дм³ у розчині ванни уловлювання, тобто в електроліті для нанесення підшару, порушується склад мідно-нікелевого покриття, що приводить до погіршення якості покриття, погіршенню зчеплення покриття з основою.

При значенні рН розчину ванни уловлювання менш 9,0 погіршується зчеплення покриття з основою, при рН більше 9,5 падає продуктивність ванни.

Таким чином, підтримка виявлених експериментально границь параметрів електролізу є істотно необхідним для реалізації способу, а порівняння технічного рішення, що заявляється, із прототипом й іншими технічними рішеннями дозволяє зробити висновок про відповідність способу, що заявляється, критеріям "новизна" й "істотної відмінності".

Приклад 1.

Зразки з магніту NdFeB розміром 5×8×15мм травлять у розчині, що містить 0,2М азотнокислого натрію й 1,5% по об'єму сірчаної кислоти при температурі 30°С і накладенні перемішування, промивають із накладенням ультразвуку. Наносять перший шар покриття нікелем з електроліту, що містить 130г/дм³ сульфату нікелю, 30г/дм³ цитрату амонію, 15г/дм³ борної кислоти, 8г/дм³ хлориду

амонію й 8г/дм³ сахарину, при доведенні значення рН розчину до 6,5 розчином амонію гідроксида, температурі 50°С, густини струму 0,25А/дм² і накладенні перемішування. Промивають. Потім наносять другий шар покриття міддю в електроліті, що містить 25г/дм³ пірофосфата міді, 110 г/дм³ пірофосфорнокислого калію, 3 г/дм розчини аміаку, при рН 8,5, густини струму 0,23А/дм², накладенні перемішування й температурі 50°С. Промивають. На мідний шар осаджують хімічно третій шар сплаву нікель-фосфор з розчину, що містить 27г/дм³ сульфату нікелю, 30г/дм³ гіпофосфіта натрію, 18г/дм³ янтарнокислого натрію, 15 г/дм³ гліцину при рН 4,0 і температурі 90°С. Промивають (з накладенням ультразвуку). Із промивних вод після осадження шарів нікелю, міді й сплаву нікель-фосфор мідь і нікель у вигляді гідроксидів. Характеристика способу наведена в табл. 1.

Зразки з покриттям: варіант А - перший шар товщиною 3мкм, другий шар товщиною 3мкм і третій шар товщиною 4мкм (всього 10мкм) і варіант Б - перший шар товщиною 10мкм, другий шар товщиною 10мкм і третій шар товщиною 5мкм (всього 25мкм) піддали іспитам на корозійну і механічну стійкість. Після витримки в 3%-ом розчині NaCl тривалістю 1 добу на покритті за варіантом А з'явилися бурі плями продуктів корозії основи, при ударному навантаженні 10⁸-10⁹ разів з енергією (1-3)×10⁻⁴ джоуль це покриття руйнувалося до основи з магніту. На покритті за варіантом Б ознак корозії основи не виявлено, зруйнувався лише шар сплаву нікель-фосфор.

Таблиця 1

Характеристика способів

Параметр	Спосіб-прототип	Пропонований спосіб	Переваги пропонованого способу
Операція у ванні	Осадження 1-ого шару Ni	Осадження підшару Ni-Cu, промивання, вилучення [Ni ²⁺] й [Cu ²⁺]	Немає витрат хімікатів на готування електроліту (див. склад в прикладі 1), на підігрів, немає витрати нікелевого анода, зменшується тривалість операції, знижуються витрати на знешкодження стічних вод
Товщина покриття, мкм	3-15	1-2	
Витрата нікелевого анода, г/м ²	26-133	-	
Тривалість, хв.	15-75	10-20	
Операція у ванні	Промивання	-	Немає витрат на ванну, витрати води, що виносять після нанесення підшару компоненти електроліту повертаються в основну ванну
Винос металів для знешкодження, г/м ²	[Ni ²⁺]-5,2	-	
Витрата води, л/м ²	30	-	
Операція у ванні	Осадження шару міді	Осадження шару (Cu-Ni)/(Ni-Cu)	
Товщина покриття, мкм	3-15	9-13	Знижується витрата анодів, немає витрат на підігрів, зменшується тривалість операції
Витрата мідного анода, г/м ²	27-134	54-77	
Витрата нікелевого анода, г/м ²	-	27-38	
Тривалість, хв.	65-330	45-90	
Операція у ванні	Промивання	Промивання	
Винос металів для знешкодження, г/м ²	[Cu ²⁺]-1,3	[Ni ²⁺]-0,78, [Cu ²⁺]-0,26	Знижується витрата води, винос компонентів електроліту
Витрата води, л/м ²	15	10	

Продовження таблиці 1

Операція у ванні		Осадження шару сплаву NiP	-	Немає витрат на ванну, хімікатів на готування електроліту, коректування розчину і його регенерацію, витрат на підігрів, не затрачається час на операцію
Товщина покриття, мкм		4-7	-	
Витрата гіпофосфіта натрію, г/м ²		254-438	-	
Витрата солі нікелю (у перерахуванні на анод), г/м ²		36-62	-	
Тривалість, хв.		18-30	-	
Операція у ванні		Промивання	-	Немає витрат на ванну, витрат води, виносу компонентів електроліту для нанесення покриття
Винос металів для знешкодження, г/м ²		[Ni ²⁺]-1,0	-	
Витрата води, л/м ²		10	-	
Всього, за способом	Витрата мідних анодів, г/м ²	28,3-135,3	54,3-77,3	Зниження витрати нікелевих анодів в 2-5 разів, мідних анодів - в 0,5- 2 рази, води в 5 разів, тривалості осадження покриття в 2-4 рази.
	Витрата нікелевих анодів, г/м ²	68,2-201,2	27,8-38,8	
	Витрата води, л/м ²	55	10	
	Тривалість, хв.	105-440	60-115	

Приклад 2-4.

Зразки з магніту NdFeB розміром 5×8×15мм травлять як у прикладі 1, промивають із накладенням ультразвуку. Зразки завантажують у ванну уловлювання основного електроліту (склад розчину ванни уловлювання і умови електролізу дивись у табл.2). Температура кімнатна, накладення перемішування. Аноди нерозчинні, у контейнерах з

діафрагмою. Потім деталі без промивання переносять в основну ванну (склад електроліту і умови електролізу дивись у табл.2). Аноди комбіновані Cu/Ni. Після нанесення покриття деталі промивають у ванні уловлювання основного електроліту, тобто, у ванні для нанесення підшару, і у ваннах промивання. Характеристика способу наведена в табл.1 і 2.

Таблиця 2

Склад електролітів і умови електролізу

Параметри	Приклади		
	2	3	4
Ванна уловлювання			
[Cu ²⁺], г/дм ³	0,02	0,5	1,0
[Ni ²⁺], г/дм ³	3,0	4,0	5,0
pH	9,0	9,2	9,5
J _k А/м ²	30	40	50
Товщина шару, мкм	1,0	1,5	2,0
Електроліт			
[Ni ²⁺]:[Cu ²⁺]	2	5	10
[(NH ₄) ₂ P ₂ O ₇], г/дм ³	180	300	450
[NH ₄ Cl], г/дм ³	4,0	4,5	5,0
pH (за допомогою NH ₄ OH)	8,2	8,5	8,7
J ₁ , А/м	20	50	70
t ₁ , с	50	70	90
J ₂ , А/м ²	50	120	200
t ₂ , с	20	35	50
Товщина шару, мкм	9	11	13
Мікротвердість, МПа	410	560	680
Корозійна стійкість (див.прикл.1)	Продуктів корозії магніту немає		
Механічна стійкість (див.прикл.1)	Руйнується 4мкм покриття	Руйнується 3мкм покриття	Руйнується 3мкм покриття

Таким чином, зіставлення даних, наведених у прикладах, показує, що запропонований спосіб забезпечує скорочення кількості операцій, зниження витрат води, матеріалів й енергоспоживання. Економічна доцільність використання запропонованого

способу обумовлена економією металів у вигляді анодів як за рахунок кращої корозійної стійкості мультшарових покриттів (Cu-Ni)/(Ni-Cu), що дозволяє наносити більш тонкі покриття, так і за рахунок сполучення операцій осадження підшару (першого

шару) і вилучення металів з ванни уловлювання цього електроліту, зниженням енергоспоживання за рахунок реалізації способу без підігріву і витрат на воду за рахунок зменшення кількості ванн промивання.

Джерела інформації:

1. US 20090035603, B32B15/01, C25D 3/38. Method for producing rare earth metal-based permanent magnet having copper plating film on surface thereof /Ni і пае, Toshinobu - Опубл. 05.02.2009.

2. US 5314756, B22F7/00. Permanent magnet of rare-earth-element/transition-metal system having important corrosion resistance and manufacturing method thereof / Atsushi Tagaya - Опубл. 24.05.1994.

3. EP20050809460, H02K15/03; C23C28/00; C23C28/02; C25D5/12; C25D 5/48; C25D7/00; H01F1/053. Process for producing permanent magnet for use in automotive IPM motor / Komatsu, T., Shintani, Y., Takahashi, K., Kabasawa, A., Okada, H., Miyao, Y., Kaneko, Y. - Опубл. 08.08.2007.

4. Бондарь В.В., Гринина В.В., Павлов В.Н. Электроосаждение двойных сплавов. (Итоги науки и техники). - 1979, т. 16. - 329с.

5. Патент № 79556 Україна, С 25 D 3/56, 5/12. Спосіб одержання захисно-декоративних багатощарових покриттів / Трубнікова Л.В., Байрачний Б.І., Савченко В.О., Майзеліс А.О. Опубл. 25.06.07, Бюл. №9.