

УДК 621.7.047.7

DOI 10.36910/6775-2313-5352-2021-19-1

<sup>1</sup>Абрамов С.О., <sup>1</sup>Гришин В.С., <sup>2</sup>Довганюк Г.М.<sup>1</sup>Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна<sup>2</sup>Фаховий коледж ракето-космічного машинобудування Дніпровського національного університету, м. Дніпро, Україна

## ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ДЕТАЛЕЙ З МАГНІТО-М'ЯКИХ СПЛАВІВ ШЛЯХОМ КОМПЛЕКСНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПАРОПЛАЗМЕНОЇ ОБРОБКИ

*Підвищення експлуатаційних характеристик деталей електроклапанів, рушійних установок орбітальних супутників, а отже, їх життєвого циклу, можливо добитися застосуванням різних технологій їх поверхневої обробки, таких як нанесення спеціальних покриттів, модифікація робочих поверхонь деталей, а також підбором методів обробки для зменшення залишкових напруг. Специфіка оброблюваних деталей (корозійна стійкість, магнітні властивості) потребує розробки спеціальних методів покриття. Була проведена підготовка вихідних даних для розробки технологій покриттів на основі аналізу літературних джерел та раніше проведених досліджень.*

*Експериментально проведена активація поверхні з магніто-м'якого сплаву під покриття хромом з наступним поліруванням. На основі розробленого комплексного технологічного процесу, який засновано на сучасних методах підготовки та активації поверхонь під покриття, екологічно безпечних методах хромування, експериментально доведено ефективність одержання якості поверхонь магніто-м'яких сплавів. Та доказано, що процес пароплазмової обробки можливо використовувати, як при підготовці поверхні під покриття, так і безпосередньо для нанесення покриття.*

**Ключові слова:** активація поверхні, покриття, сплави, технологічний процес, пароплазмова обробка, хромування, полірування.

**Постановка проблеми.** Прецизійні деталі електроклапанів, виготовлені з магніто-м'яких залізо-хромових сплавів повинні задовольняти вимогам експлуатації. Технологічне забезпечення виготовлення таких деталей з оптимальним сполученням основних фізико-механічних, магніто-фізичних, антикорозійних властивостей пов'язано з суттєвими складнощами обумовленими комплексним сполученням характеристик, які часто бувають взаємовиключними [1].

Одним із самих розповсюджених та затребуваних процесів, що дозволяють вирішувати проблеми захисту поверхневого шару виробів є хромування [2]. Дослідження властивостей та структури електролітичного хромового покриття магніто-м'яких сплавів в традиційних ваннах хромування на основі шестивалентного хрому показали достатньо високу корозійну стійкість і добрі електромагнітні якості. Але відомо, що процес хромування на основі хромової кислоти, відноситься до вищого класу екологічної небезпеки, так як, в якості основних компонентів використовують високотоксичні сполуки шестивалентного хрому.

Тому проведення досліджень альтернативних безпечних технологій хромування для підвищення експлуатаційної надійності деталей з прецизійних магніто-м'яких залізо-хромових сплавів є актуальною задачею.

**Основне завдання та одержані результати роботи.** Метою дослідження є проведення експериментальних досліджень по підвищенню експлуатаційної надійності деталей електроклапанів з магніто-м'яких залізо-хромових сплавів шляхом створення технологічних методів, які формують фізико-механічні, магніто-фізичні та корозійностійкі характеристики поверхневого шару деталей в умовах екологічної безпеки.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

1. Підготовка вихідних даних для розробки технологій покриттів на основі аналізу літературних джерел та раніше проведених досліджень.
2. Розробка технологій активації поверхонь прецизійних магніто-м'яких сплавів перед нанесенням покриттів.
3. Розробка технологічних процесів покриття поверхонь зразків із прецизійних магніто-м'яких сплавів хромом в умовах екологічної безпеки.
4. Дослідження і розробка технології пароплазмової поліровки деталей з магніто-м'яких сплавів.

Серед процесів електролітичного осадження різноманітних металів і сплавів хромування займає особливе місце через низьку унікальних властивостей одержуваних покриттів і специфічні особливості хімії та електрохімії сполук хрому.

Низький коефіцієнт тертя покриттів на основі хрому та їх магнітні властивості, дозволяють застосувати їх при виготовленні деталей із магніто-м'яких залізо-хромових сплавів. Окрім того, слід особливо відзначити високу мікротвердість хромових гальваноосадів, ця величина суттєво перевищує притаманну іншим електроосадженим металом і сплавам на їх основі[2].

Слід підкреслити, що хромові електролітичні покриття у промисловості протягом багатьох десятиліть одержували і продовжують отримувати з електролітів на основі сполук шестивалентного хрому.

Добре відомо, що сполуки хрому у ступені окислення +6 є надзвичайно токсичними та шкідливими як для навколишнього середовища, так і для обслуговуючого персоналу. У наш час у зв'язку з підвищеною увагою до проблем охорони навколишнього середовища використання сполук Cr(VI) суворо обмежується у США, Європейському Союзі, Японії та інших промислово розвинутих країнах.

Саме тому розробка процесів хромування електролітів на основі солей Cr(III) як альтернативи екологічно небезпечним процесам, що передбачають використання сполук Cr(VI), є однією з основних задач сучасної гальванохімії [2, 5].

Умови електролізу та склад електроліту суттєво впливають на мікроструктуру електроосаджуваних хромових покриттів. Великий вміст вуглецю в осаджених хромових покриттях також призводить до зростання їх гідрофобності та зниження контактного опору.



Рис. 1. Морфологія поверхні «трьохвалентних» хромових покриттів, х400 – оксалатно-сульфатний електроліт хромування

Проведені дослідження альтернативної, безпечної технології хромування на основі солей трьох валентного хрому показали, що якість покриття Cr(III) товщиною 15-20мкм значно поступається стандартному покриттю Cr(VI) через велику кількість глобулярних утворень, поверхні покриттів мають грубий вигляд через неоднорідність осаду (рис. 1), що говорить про недосконалість існуючих технологій. У зв'язку з цим представляє інтерес дифузійне хромування, яке надає виробам опір ерозії, втоми, корозії, високі електромагнітні властивості [3]. Крім цього сприяє захисту навколишнього середовища (відсутність зливів шкідливих електролітів), а також здешевлює виробництво виробів. Для досягнення поставленої мети було досліджено пароплазмовий метод осадження хрому на поверхні магніто-м'яких залізо-хромових сплавів.

Експлуатаційні характеристики хромових покриттів, міцність покриття та його зчеплення з підкладкою у значній мірі залежать від підготовки поверхонь (мікрорельєфу, залишкових напружень, тощо) перед осадженням хрому. Були проаналізовані різні способи попередньої обробки поверхонь [4].

Зразки для досліджень виготовлялись у вигляді сталевих дисків з отвором під кріплення зі сплаву 16Х-ВН. Традиційно підготовка поверхонь під покриття виконується наступними методами: механічною обробкою, знежирюванням та травлінням. Але всі ці методи мають недоліки:

- традиційні механічні впливи на магніто-м'які сплави призводять до значних пластичних деформацій, або залишковим напругам, що погіршують властивості сплавів, покриттів;

- хімічні методи пов'язані з небезпечністю та екологічною шкідливістю.

Рахуючи вищезгадане виникає необхідність в розробці сучасного, екологічно небезпечного методу підготовки і активації поверхонь під покриття.

Одним з таких методів є струменево-абразивна обробка гранулами удароміцного сополімер стиролу [6].

В процесі дослідження, проведено порівняльний фракційний аналіз абразивного матеріалу для активації поверхні методом струменевої обробки.

Найбільша різнофракційність спостерігається в абразивному матеріалі сополімер стиролу КУ-2-8 (фракція 1,5мм) та складає 87,5% рисунок 2.



Рис. 2. Загальний вид досліджуваного сополімер стиролу КУ-2-8

Дослідження проводилися при наступних припущеннях: гранули удароміцного сополімеру стиролу мають однакову сферичну форму (рис. 2); жорсткі гранули, співвідношення розмірів реальних гранул і оброблюваної поверхні зразка дозволяють розглядати робочий зазор як плоский.

Однією з умов підготовки поверхні під покриття є зниження шорсткості поверхні, зміна якої може бути визначена як:

$$Ra_i(Z, V) = \sum_{j=1}^N r(Z, V) \rightarrow \min, \quad (1)$$

де:  $N$  – кількість одиничних актів контактної взаємодії на елементарному майданчику;  $r$  – величина лунки після одиничного акту контактної взаємодії;  $Z$  – зернистість абразивної частинки;  $V$  – швидкість абразивного потоку.

Експериментально підтверджено, що застосування струменево-абразивного метода для підготовки поверхонь магніто-м'яких сплавів під покриття значно впливає на шорсткість поверхні, яка залежить від розмірів абразивних частинок. Зі збільшенням зернистості абразивного матеріалу висота мікронерівностей різко зростає, так як збільшуються розміри лунок, що залишаються на поверхні ламелей, які оброблювали абразивними частинками.

Морфологічний скан аналіз поверхні, що оброблені гранулами сополімер стиролу КУ-2-8 наведений на рисунку 3.

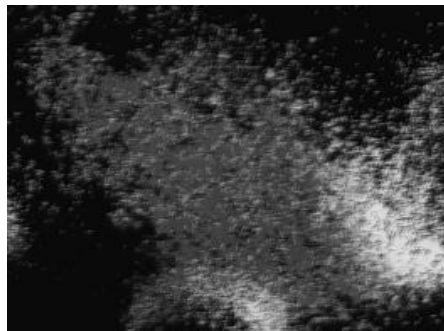


Рис. 3. Морфологічний скан аналіз поверхні обробленої удароміцними гранулами сополімер стиролу КУ-2-8 (фракція 1,5мм)

Експериментально визначено особливості формоутворення мікропрофілю поверхні в процесі струменево-абразивної підготовки під покриття. Доведено, що струменево-абразивна обробка дозволяє отримувати рівномірну шорсткість з  $Ra < 0,12$ .

Підтвердженням даного висновку служить 3D профілограма поверхні, яка оброблена гранулами сополімер стиролу (рис. 4).

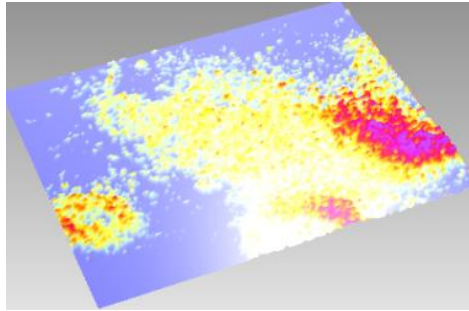


Рис. 4. 3D профілограма поверхні обробленої гранулами сополімер стиролу КУ-2-8

В процесі струменево-абразивної обробки поверхонь магніто-м'яких сплавів визначено особливості формоутворення мікропрофілю поверхонь. Взаємодія гранул сополімер стиролу з поверхнями, що обробляються призводить до утворення рівномірної шорсткості зняття окисних плівок і т.п. Все це підвищує адгезію нанесеного покриття з утвореною основою. Але недоліками цього методу при виконанні поставленої мети є те, що ударно-фракційна взаємодія гранул з оброблюваною поверхнею призводить хоч і к незначним, але ж таки концентраторам напружень та мікропластичним деформаціям поверхневих і при поверхневих шарів магніто-м'яких сплавів на глибину 100-150мкм і більше.

Зважаючи на то, що механічні впливи на ці сплави які приводять навіть до незначних пластичних деформацій, або залишковим напругам та погіршують властивості сплаву, треба завершеною операцію по підготовці поверхні під покриття проводити безконтактними методами.

При підготовці поверхні обирали методи, коли підкладка знаходиться в активному стані, як можливо більш тривалий час. В такій якості розроблена технологія пароплазмової активації поверхонь прецизійних магніто-м'яких сплавів перед покриттям. Такий спосіб дозволяє усунути дефектний поверхневий шар, поверхневих плівок та сторонніх включень, а також ретельне очищення поверхні від усіх видів забруднень та забезпечує одержання міцно зчеплених покриттів.

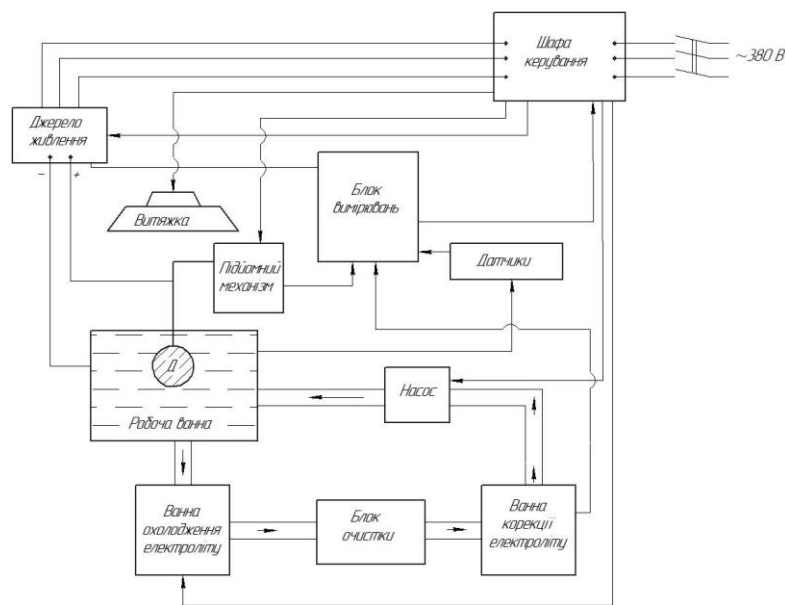


Рис. 5. Блок-схема установки для пароплазмового полірування виробів

Експериментальні дослідження проводились на дослідному устаткуванні кафедри технології машинобудування Українського державного університету науки і технологій.

Розроблена блок-схема установки для пароплазмового полірування представлена на рисунку 5.

В якості блока живлення використовувалось джерело повторного електропостачання ІВЕ-245-09 з без трансформаторним мережевим входом, працюючому на частоті перетворення 45-55кГц. Основні технічні данні блока живлення: потужність 600-6000Вт; напруга 100-1350В; струм 0,5-7,0А.

Експериментально визначено, що застосування метода паро плазмової підготовки поверхонь зразків з магніто-м'яких сплавів дозволило знизити початкову шорсткість ( $R_a$  0,8-1,0) до потрібної ( $R_a$  0,1-0,2), при цьому можлива обробка деталей складної форми.

У зв'язку з чим запропоноване комплексне пароплазмове оброблення, яке полягає в комбінуванні пароплазмової активації поверхонь під покриття ПАП, нанесення покриття пароплазмовим методом НПП, фінішна (полірування) пароплазмова обробка ФПО. Технологічний ланцюжок можливо уявити у вигляді блок-схеми (рис. 6).



Рис. 6. Блок-схема технологічного ланцюжка комплексної обробки

Вплив технологічних параметрів при ПАП та ФПО аналогічний, тому були проведені експериментальні дослідження по виявленню оптимальних значень: концентрації електроліту, напруги та часу обробки, результати яких наведені на рисунках 7, 8, 9.

В результаті проведених експериментів було виявлено оптимальні значення концентрації. Результати досліджень наведені на рисунку 7.

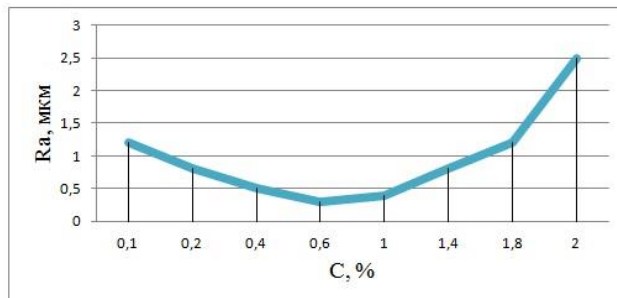


Рис. 7. Залежність шорсткості поверхні від концентрації електроліту

Робоча напруга є найважливішим параметром, що визначає якість полірованої поверхні. Не тільки з енергетичних, але і з технологічних міркувань збільшення напруги понад 350 В небажано, оскільки можливе попадання в область електрогідродинамічного режиму, коли відбувається зрив пароплазмової оболонки і електролітно-плазмова обробка неможлива. Графік залежності шорсткості поверхні від напруги наведено на рисунку 8.

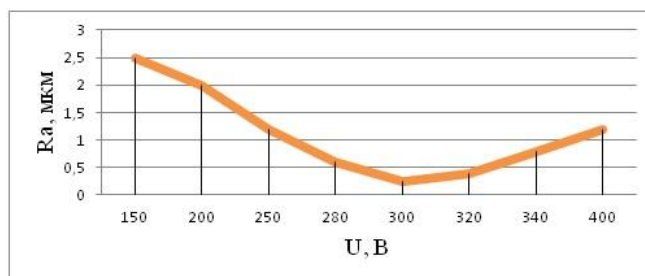


Рис. 8. Залежність шорсткості поверхні від напруги

Оптимальним значенням напруги є 300В, при ньому досягається найменша шорсткість експериментальних зразків і проходить електролітно-пароплазмова обробка.

Природно припустити, що якість полірування пропорційно її тривалості. Швидке зниження шорсткості за перші 15 секунд обробки пов'язано з тим, що проходить локальне вирівнювання мікрорельєфу у місцях найбільших виступів та впадин. Подальше збільшення тривалості обробки не дає такого істотного зміни шорсткості поверхні, а лише надає поверхні дзеркальний блиск (рис. 9).

При проведенні досліджень було виявлено оптимальний час обробки експериментального зразка - він склав 15 секунд. За цей час було отримано шорсткість поверхні  $Ra=0.16$  мкм. Експериментальним шляхом було виявлено, що зі збільшенням часу обробки досягнута шорсткість не змінюється, але відбувається зняття матеріалу за поля допусків, тому обробка експериментального зразка довше 15 секунд є недоцільною.

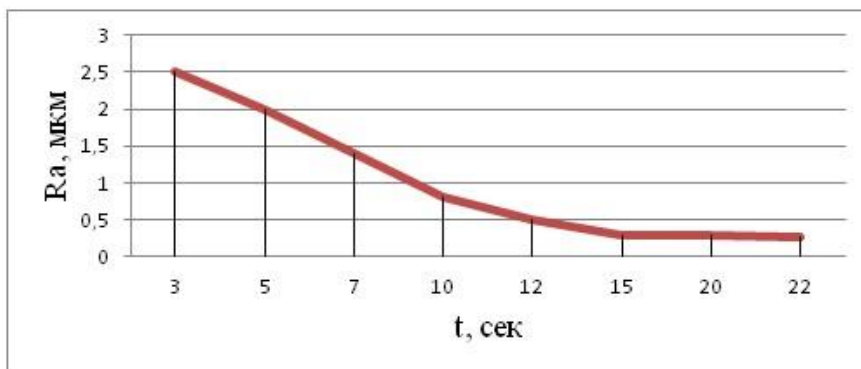


Рис. 9. Залежність шорсткості поверхні від часу обробки

Результати пароплазмової підготовки поверхні під покриття показали задовільні результати. Електроліт для формування плазми  $H^+$  із за властивостей провідних електронів осадження не відбувається. Іон водню  $H^+$  в плазмі дозволяє швидко провести очистку поверхонь від забруднення та активувати поверхню під покриття. Швидкість з якою виконується очистка та активація поверхні без контактної взаємодії, а також екологічна безпека навколишньої середовища роблять пароплазмову підготовку під покриття оптимальним технологічним процесом, який дозволяє практично повністю замінити відомі методи підготовки під покриття (рис. 10).

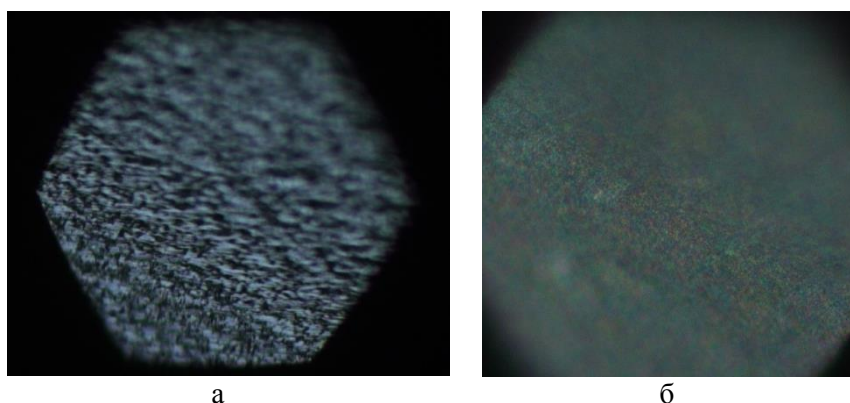


Рис. 10. Вид поверхні експериментального зразка  $\times 200$ : а – до обробки; б – після обробки

Осадження  $Cr$  на підготовлену поверхню зразка з магніто-м'якого сплаву 16Х-ВН проводилось оксалатно-сульфатним електролітом, який був нагрітий до температури  $75^{\circ}C$ , в інтервалі напруги 40-250В.

Найбільш оптимальний та стабільний процес паро плазмового нанесення покриття з хрому на магніто-м'які сплави проходить в інтервалі напруг 180-200В. Металографічні

дослідження виявили, що отримані покриття мають щільну структуру та неперервні по всій поверхні (рис. 11).

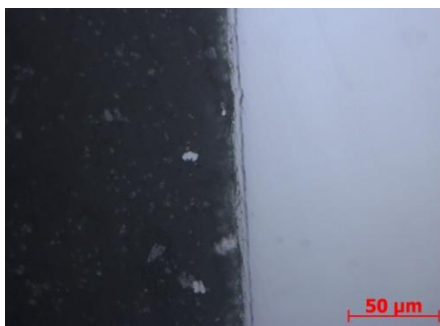


Рис. 11. Якість хромового покриття на магніто-м'яких сплавах

### Висновок

1. В роботі наведено вирішення задачі, пов'язаної з підвищенням експлуатаційної надійності деталей електроклапанів рушійних установок з магніто-м'яких залізо-хромових сплавів шляхом створення технологічних методів, які сформували фізико-механічні, магніто-фізичні та корозійностійкі властивості поверхневого шару деталей в умовах екологічної безпеки.

2. На основі розробленого комплексного функціонально орієнтованого технологічного процесу, який засновано на сучасних методах підготовки та активації поверхонь під покриття, екологічно безпечних методах хромування експериментально доведено ефективність одержання якості поверхонь магніто-м'яких сплавів. Доказано, що процес пароплазмової обробки можливо використовувати, як при підготовці поверхні під покриття, так і безпосередньо для нанесення покриття.

3. Експериментально визначено можливості формоутворення мікропрофілю поверхні в процесі струменево-абразивної підготовки під покриття. Доведено, що струменево-абразивна обробка дозволяє отримувати рівномірну шорсткість поверхонь під покриття з  $Ra < 0,12$  з незначними концентраторами напружень та з мікропластичною деформацією поверхневих шарів магніто-м'яких сплавів на глибину 100-150мкм та більше.

4. Використання технологічного ланцюжка ПАП-НПП-ФПО для підвищення працездатності деталей з магніто-м'яких сплавів дозволяє отримати високу якість хромового покриття екологічно безпечними технологіями.

5. Експериментальні результати досліджень запропоновано для випробувань на Державному підприємстві «Конструкторське бюро «Південне» імені М.К. Янгеля».

### Інформаційні джерела

1. Шишков М.М. Марочник сталей і сплавів: Довідник. Вид 3-є, доповнене. Донецьк, 2000.- 456с.

2. Данилов Р.И., Проценко В.С. Электроосаждения хрома электролитів на основі сполук Cr (III): Огляд // *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii* 2020, №. 2., pp. 4-29.

3. Лайнер В.И. Защитные покрытия металлов. Металлургия, М., 1974.– 559 с.

4. Velychko O.G., Liu T., Abramov S.O., Marchuk I.V., Gryshin V.S. Technological features of the preparation of cluster thermal barrier coatings on copper surfaces of the converter lance tips // *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, Dniepr. Ukrainian State University of Chemical Technology 2020, No. 3, pp. 53-58.

5. Погребняк А.Д., Каверина А.Ш., Калышканов М.К. Электролитно плазменная технология для нанесения покрытий обработки металлов и сплавов // *Физикохимия поверхности и защита метериалов*. 2014. Т.50, №1. С. 72-88.

6. Абрамов С.О. Обгрунтування абразивного матеріалу для активації поверхні мідної ламелі струменево-абразивним методом. *Наукові нотатки*. Луцьк. 2019. № 66. С. 10-17.

<sup>1</sup>Абрамов С.А., <sup>1</sup>Гришин В.С., <sup>2</sup>Долганюк Г.Н.

<sup>1</sup>Український державний університет науки і технологій, г. Дніпро, Україна

<sup>2</sup>Спеціальний коледж ракетно-космічного машиностроєння Дніпровського національного університету, г. Дніпро, Україна

### ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ МАГНИТНО-МЯГКИХ СПЛАВОВ ПУТЕМ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПАРОПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

*Повышение эксплуатационных характеристик деталей электроклапанов, движущих установок орбитальных спутников, а следовательно, их жизненного цикла возможно добиться применением различных технологий их поверхностной обработки, таких как нанесение специальных покрытий, модификация рабочих поверхностей деталей, а также подбор методов обработки для уменьшения остаточных напряжений. Специфика обрабатываемых деталей (коррозионная стойкость, магнитные свойства) требует разработки специальных методов покрытия. Была проведена подготовка исходных данных по разработке технологий покрытий на основе анализа литературных источников и ранее проведенных исследований.*

*Экспериментально проведена активация поверхности из магнитно-мягкого сплава под покрытие хромом с последующей полировкой. На основе разработанного комплексного технологического процесса, основанного на современных методах подготовки и активации поверхностей под покрытие, экологически безопасных методах хромирования, экспериментально доказана эффективность получения качества поверхностей магнитно-мягких сплавов. И доказано, что процесс пароплазменной обработки можно использовать как при подготовке поверхности под покрытие, так и непосредственно для нанесения покрытия.*

**Ключевые слова:** активация поверхности, покрытие, сплавы, технологический процесс, пароплазменная обработка, хромирование, полировка.

<sup>1</sup>Abramov S.O., <sup>1</sup>Grychin V.S., <sup>2</sup>Dovganuk G.M.

<sup>1</sup> Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine

<sup>2</sup> Special College of Rocket and Space Engineering Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

### INCREASING THE PERFORMANCE OF PARTS MADE OF MAGNETIC-SOFT ALLOYS BY INTEGRATED TECHNOLOGY OF STEAM PLASMA TREATMENT

*Improving the operational characteristics of parts of electro valves, propulsion units of orbital satellites, and, consequently, their life cycle can be achieved by using various technologies for their surface treatment, such as applying special coatings, modifying the working surfaces of parts, as well as selecting processing methods to reduce residual stresses. The specificity of the processed parts (corrosion resistance, magnetic properties) requires the development of special coating methods. The preparation of initial data on the development of coating technologies was carried out on the basis of an analysis of literature sources and previous studies.*

*An experimentally carried out activation of a surface made of a soft magnetic alloy under chrome plating followed by polishing. On the basis of the developed complex technological process based on modern methods of preparation and activation of surfaces for coating, environmentally friendly methods of chromium plating, the efficiency of obtaining the quality of surfaces of soft magnetic alloys has been experimentally proved. And it has been proven that the process of vapor-plasma treatment can be used both in preparing the surface for coating, and directly for coating.*

**Key words:** surface activation, coating, alloys, technological process, plasma vapor treatment, chromium plating, polishing.