

Л. В. ЛИТОВЧЕНКО, В. П. КОЛЕСНИК, О. М. ЧУГАЙ, А. О. БОЯРКІН,
Д. В. СЛЮСАР, М. П. СТЕПАНУШКІН, С. В. ОЛІЙНИК

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Україна

ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ІНВЕРСНОЇ МАГНЕТРОННОЇ РОЗПОРОШУВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ПОКРИТТІВ (СПОСІБ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ РОЗПОРОШЕННЯ ТА ЙОГО ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ)

На основі аналізу літературних даних щодо засобів забезпечення необхідного ресурсу деталей машин та механізмів показана необхідність застосування в машинобудуванні функціональних покриттів, які можуть утворюватися багатьма шарами та мати в своєму складі цілу низку компонентів. Існуючі технології та відповідне обладнання потребують попереднього виготовлення сплавів, з яких формуються покриття. Це суттєво обмежує керування складом покриттів. Показано перевагу над існуючими іонно-плазмовими технологіями, розроблених в Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». Зокрема, завдяки розпорошенню великої кількості катодів-мішеней ці технології дозволяють формувати багатокомпонентні покриття практично будь-якого складу. При реалізації іонно-плазмових технологій формування покриттів визначальну роль відіграє генератор потоку частинок матеріалу покриття. З метою вдосконалення системи електроживлення такого генератора запропоновано здійснювати подавання напруги до кожного елемента генератора через ланцюжок резисторів, загальний опір якого регулюється системою управління за відповідною програмою. Такий підхід до вдосконалення системи електроживлення технологічного генератора матеріалу покриття втілено в життя в розробленій лабораторній дослідно-промисловій технологічній установці для формування модельного покриття з карбиду вольфраму. Розглянуто дві можливі схеми створення резистивних ланцюжків, опір яких регулюється. Обрано схему, яка складається з найменшої кількості елементів. Встановлено важливу роль будь-якого резистивного ланцюжка в функціонуванні системи управління технологічним генератором. Запропоновано оптимальний варіант вибору номіналів опорів резисторів, що входять до складу ланцюжка. Проведений авторами аналіз експериментальних даних свідчить про те, що кожен такий ланцюжок повинен мати індивідуальні особливості, зокрема, межі та крок зміни опору, максимальну потужність теплових втрат. Ці та інші параметри, як правило, визначаються експериментально.

Ключові слова: іонно-плазмові технології; системи електроживлення; системи управління; багатокомпонентні покриття; карбід вольфраму.

Вступ

Однією з основних задач сучасного машинобудування є забезпечення заданого ресурсу деталей механізмів і машин. Ця задача розв'язується двома шляхами: створенням нових матеріалів (сплавів, керамік та ін.) або модифікацією поверхневого шару матеріалу, що вже використовується в машинобудуванні. Тому поверхня деталей, виготовлених з сучасних матеріалів, повинна володіти низкою властивостей: високою механічною міцністю та твердістю, стійкістю до знакозмінних навантажень, високою антикорозійною стійкістю та зносостійкістю, жароміцністю і жаростійкістю, стійкістю до ерозійного зносу (як іонного, так і пилового). Цей перелік фізико-технічних вимог до поверхні деталей, безумовно, не є повним. Важливо також забезпечити

низьку собівартість виготовлення покриття поверхні деталі. При цьому об'єм («тіло») деталі виготовляють з відносно дешевих матеріалів, які протистоять основним механічним навантаженням. Серед широкого спектру методів модифікації властивостей поверхні матеріалів [1-5] широко застосовуються вакуумні іонно-плазмові методи [6-8]. Ці методи дозволяють не лише змінювати структуру та властивості поверхневих шарів, але й наносити на них функціональні покриття.

Останнім часом поширюється використання в машинобудуванні таких функціональних покриттів, що суттєво змінюють механічні властивості поверхневих шарів деталей машин і механізмів. В склад таких покриттів входять чисельні як металеві, так і неметалеві компоненти. Покриття можуть бути не лише одношаровими, але й багатошаровими. Для

формування вказаних покриттів методами електронно-променевого випаровування українськими вченими [9, 10] було запропоновано використовувати композиційні зливки. Це дозволяє формувати градієнтні покриття, в склад яких входять металеві та неметалеві компоненти. В працях [11, 12] для створення шарів на основі високоентропійних сплавів використовувалися катоди, склад яких співпадає зі складом покриття, що формується на поверхні деталі. Для вирішення проблеми формування багатокомпонентних покриттів іноземні вчені [13, 14] також використовували попередньо виготовлені складні сплави. Такий шлях вирішення вказаної проблеми суттєво обмежує можливості проектувальників при розробці нових складів покриттів, через значні труднощі, а деколи й неможливість створити сплав необхідного компонентного складу. Крім того, створення складних сплавів - це достатньо трудомісткий і дорого вартісний процес.

Ще кілька десятиліть тому вітчизняними й закордонними вченими запропоновано та реалізовано на практиці нанесення покриттів шляхом генерації потоків частинок чистих металів або часткових сплавів, тобто сплавів, до складу яких входить частина компонентів покриття, яке формується [9, 15]. Слід зазначити, що існуюче обладнання для іонно-плазмового нанесення покриттів, через його конструктивні особливості, має обмеження на кількість генераторів потоку матеріалу покриття, які можуть бути одночасно використані в робочій зоні технологічного відсіку вакуумної камери (Вітчизняна установка «Булат-9», російська «Квадро» та інші).

В Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» розроблено нові іонно-плазмові розпорозувальні системи (нові технологічні генератори потоку частинок матеріалу покриття) [16, 17], які є різновидом інверсних магнетронних систем [18], виготовлено лабораторні дослідно-промислові технологічні установки (ДПТУ) на їх основі та розроблено нові технології, в яких зроблено спробу усунути недоліки традиційних технологій, що вимагають попереднього створення багатокомпонентних катодів. Завдяки розпорозенню великої кількості катодів-мішеней, що виготовлені з окремих компонентів покриття або з часткових сплавів, ці технології дозволяють формувати багатокомпонентні покриття практично будь-якого складу, включаючи градієнтні. Слід зазначити, що використання в робочій зоні технологічного відсіку на додаток до плазмоутворюючого (за звичай – аргону) різноманітних реагентних газів розширює можливості управління складом покриттів. Причому управління електричними параметрами системи розпорозення дозволяє формувати покриття з поступово змінюваними парамет-

рами як по товщині, так і по поверхні покриття [16, 17]. Разом з тим існує низка не вирішених питань, що стосуються означених технологій та відповідного обладнання. Мета цієї статті полягає в обґрунтуванні схеми побудови системи електроживлення інверсної магнетронної розпорозувальної системи для формування багатокомпонентних покриттів та способу управління процесом розпорозення.

Система електроживлення технологічного генератора плазми: обґрунтування вибору та її практична реалізація

Головною складовою лабораторної ДПТУ для нанесення покриттів іонно-плазмовим методом є технологічний генератор потоку частинок матеріалу покриття. Принцип дії цього генератора подібний до принципу дії традиційних магнетронних розпорозуючих систем (МРС). Особливостями розробленого генератора є те, що стінки вакуумної камери одночасно відіграють роль його елементів. Окрім того, за винятком зони генерації, будь-який елемент генератора може виконувати роль катоду-мішені. Це значно спрощує чистку вказаних електродів від адсорбованих на їх поверхні сторонніх атомів.

Генератор має спільну для всіх катодів-мішеней зону генерації іонів плазмоутворюючого газу, яка фактично знаходиться під тим же потенціалом, що і аноди пристрою завдячуючи високій концентрації заряджених часточок.

В проміжку між зазначеною зоною та необхідною кількістю катодів-мішеней, тобто в протяжній зоні прискорення іонів, горить така ж кількість аномальних тліючих розрядів, як і кількість катодів-мішеней. Важливо, що параметри цих розрядів можна змінювати згідно заданої програми. Властивості кожного з цих розрядних проміжків описуються своєю сукупністю вольт-амперних характеристик (ВАХ), які залежить від режиму роботи генератора матеріалу покриття у цілому. За потреби в означеній ДПТУ можна встановити десятки катодів-мішеней, об'єднавши однакові з них за складом в окремі групи. Причому кількість таких груп визначається складом покриття, що формується. Характерні розміри окремих катодів-мішеней можна змінювати в широких межах в залежності від особливостей технологічного процесу. Зазначимо, що склад багатокомпонентного покриття змінюється в залежності від розподілу потенціалів між групами катодів-мішеней.

Фізико-технічні параметри зони генерації іонів газів (середня енергія іонів, максимальна густина їх потоку, характер розподілу цієї величини в різних напрямках тощо) залежать від багатьох чинників:

конфігурації та величини магнітного поля, геометрії розрядних проміжків, розподілу електричного потенціалу на елементах технологічного генератора, тиску плазмоутворюючого газу. Отже на параметри та характеристики цього генератора впливає велика кількість чинників. Слід зауважити, що всі ці параметри пов'язані між собою. Причому зв'язок між ними, зазвичай, має нелінійний характер.

Можливі два підходи до створення системи електроживлення (СЕЖ) такого технологічного генератора. Перший підхід полягає в використанні для живлення кожного елемента генератора свого джерела з попередньо визначеним інтервалом зміни електричних параметрів. Але цей підхід доцільний у випадку однорежимної установки, призначеної для нанесення покриття незмінного складу. В такому випадку потенціал кожного елемента технологічного джерела задається параметрами відповідного джерела живлення.

Другий підхід – використання однієї СЕЖ з можливістю подавання напруги до кожного елемента технологічного генератора через ланцюжки резисторів, загальний опір яких регулюється системою управління за відповідною програмою. Кожен такий ланцюжок виконує дві функції: по перше, він виконує роль баластного опору, що обмежує струм в розрядному колі, де є ланка з від'ємним диференціальним опором, тобто в нашому випадку – газовий розряд; по друге: ланцюжок виконує функції регулятора режиму розряду, оскільки його включено послідовно з проміжком розряду, а величина опору ланцюжка змінюється системою управління. Зміна падіння напруги на ланцюжку впливає на напругу та струм розряду, наслідком чого буде зміна потоку й енергії іонів, що попадають на поверхню електроду.

Цей спосіб задовольняє вимогам до дослідницької установки, яка забезпечує формування покриттів з різним співвідношенням компонентів і різною кількістю шарів в покритті. В цьому випадку частина повного розрядного струму, що протікає через відповідний ланцюжок резисторів та елемент технологічного джерела (групу катодів-мішеней або якийсь з екранів), створює на елементі необхідний потенціал відносно корпусу технологічного відсіку. Останній виконує роль загального електроду, який приєднано до негативного полюсу джерела живлення. Суттєвою відмінністю описаного способу електроживлення технологічного генератора порівняно з тим, який відповідає першому підходу до створення СЕЖ, є те, що потенціали всіх елементів змінюються в залежності від режиму роботи технологічного джерела в цілому. Суттєвою особливістю функціонування СЕЖ лабораторної ДПТУ є можливість зміни у достатньо широких межах сумарного опору

ланцюжка резисторів для кожного елемента технологічного генератора.

Оскільки коло питань, які необхідно розглянути при створенні СЕЖ достатньо широке, їх опис доцільно розділити на кілька частин. В першій частині розглянуто загальні питання, в наступній (готується до публікації) – принцип створення регульованих резистивних ланцюжків, методи вибору резисторів для їх реалізації та елементи комутації. Крім того, планується розглянути складові системи управління дослідно-промислової технологічної установки, яка контролює, зокрема, систему резистивних ланцюжків.

Другий підхід до створення СЕЖ технологічного генератора втілено в життя в ХАІ. Розроблено лабораторну дослідно-промислову технологічну установку для формування модельного покриття – карбід вольфраму. ДПТУ оснащено джерелом живлення потужністю 20 кВт з максимальною напругою 2500 В. Особливістю цієї установки є використання окремого розпорошення груп катодів-мішеней з вольфраму та вуглецю. Співвідношення компонентів в покритті визначається інтенсивністю розпорошення відповідної групи катодів-мішеней. Управління складом покриття здійснюється зміною загального опору резистивних ланцюжків, з'єднаних з відповідними групами катодів-мішеней (рис. 1.1).

Необхідно зазначити важливу роль будь-якого резистивного ланцюжка в управлінні роботою технологічного генератора. Досвід використання такого генератора свідчить про те, що резистивний ланцюжок для кожного з електродів генератора повинен мати індивідуальні особливості, зокрема межі та крок зміни опору. В переважній більшості ці та інші параметри було визначено експериментально з урахуванням, зокрема, ВАХ для окремих електродів технологічного генератора.

Низку таких ВАХ для групи катодів-мішеней з вольфраму показано на рис. 1.2. Характеристики одержані при різних постійних значеннях загального струму через анод технологічного генератора.

Отже, виходячи з викладеного вище, можна стверджувати, що одним з важливих елементів системи живлення технологічного генератора (див. рис. 1.1) є резистивний ланцюжок з елементами регулювання величини його опору. Зупиняючись на схемі цієї системи більш детально, зазначимо, що всі елементи технологічного генератора підключено до мережі живлення через резистивні ланцюжки. Причому ланцюжки, які включено між джерелом живлення та анодами генератора, виконують додаткову роль обмежувачів його загального струму.

Зазначимо, що при виборі типів резисторів для ланцюжка необхідно врахувати потужність тепловиділення в них, адже падіння напруги на деяких

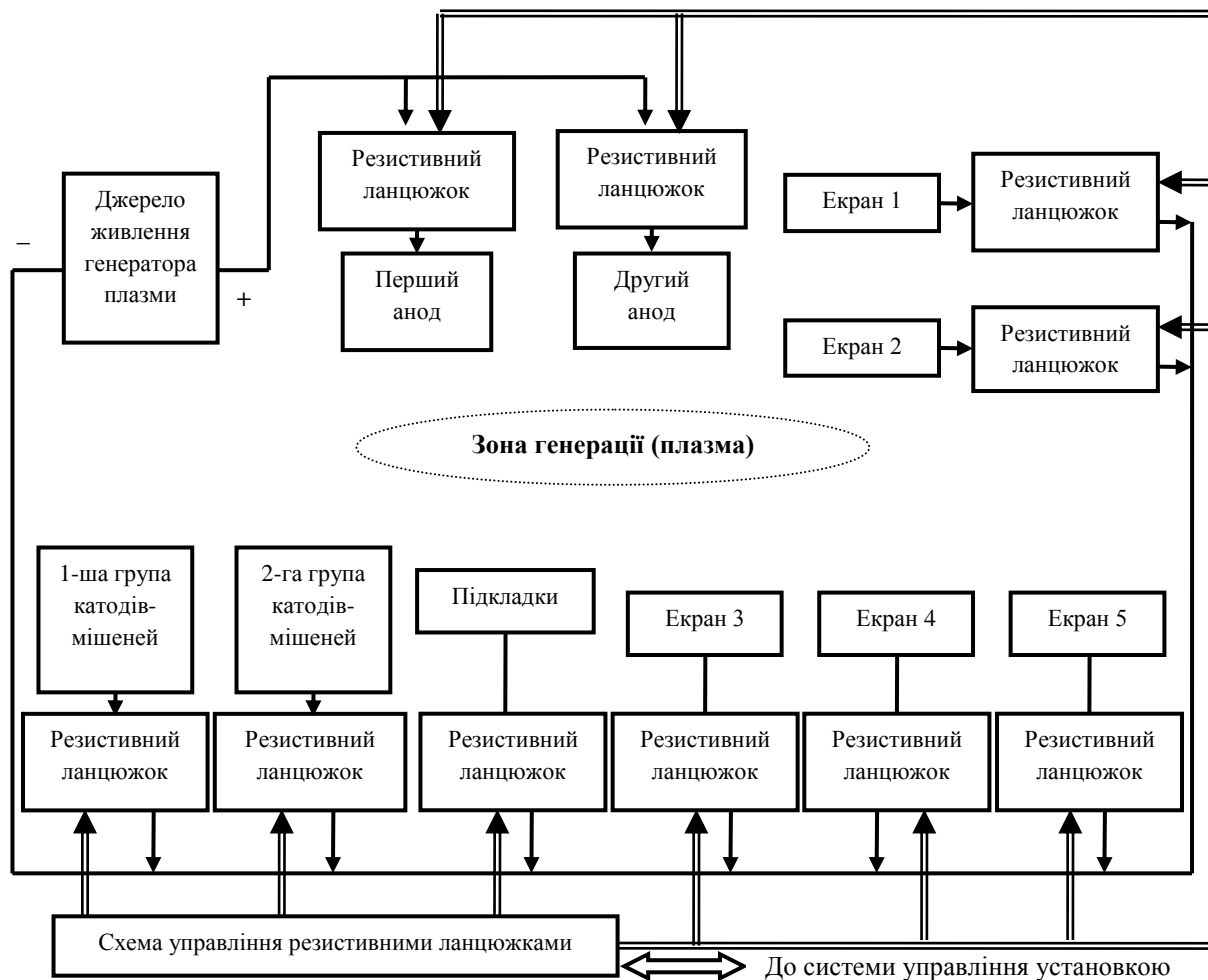


Рис. 1.1. Схема живлення розрядів в технологічному генераторі плазми

резисторах може досягати кількох сотень вольт, або навіть перевищувати кіловольт.

Накопичений досвід використання генератора свідчить про те, що кожен ланцюжок резисторів слід формувати з ячеек, з'єднаних послідовно (рис. 1.3). При цьому, вочевидь, опір кожної ячейки необхідно визначати з таким розрахунком, щоб схема комутації ячеек забезпечувала потрібний опір усього ланцюжка.

На рис. 1.4 приведена ще одна схема послідовного з'єднання резисторів у ланцюжок. Особливістю цієї схеми є те, що замикання будь-якого з ключів має своїм наслідком виключення зі схеми сукупності послідовно з'єднаних резистивних від цього ключа ячеек аж до корпусу генератора. Тобто при використанні схеми з'єднання, що показана на рис. 1.4, резистивний ланцюжок буде сукупністю послідовно включених ячеек, опір кожної з яких має дорівнювати кроку зміни загального опору ланцюжка.

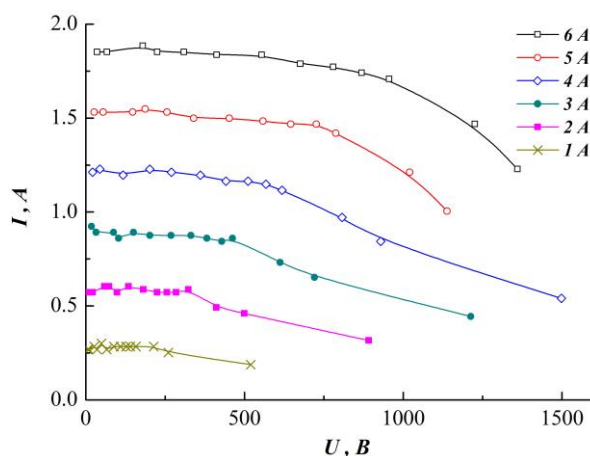


Рис. 1.2. Вольт-амперні характеристики розряду на катодах-мішенях з вольфраму при різних постійних значеннях загального струму технологічного генератора

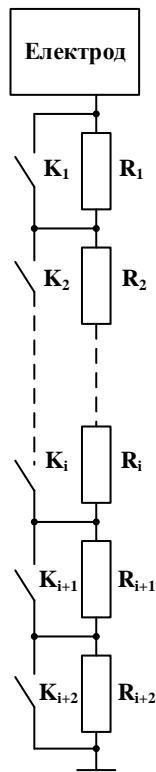


Рис. 1.3. Ланцюжок резисторів ($R_1 - R_{i+2}$) в мережі живлення електроду та ключі ($K_1 - K_{i+2}$), що їх комутують

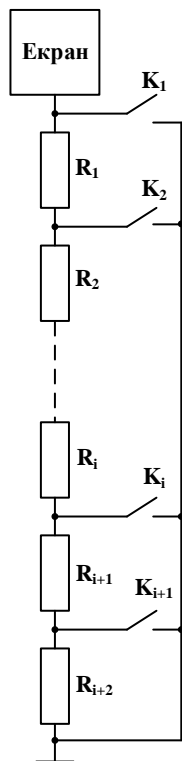


Рис. 1.4. Ланцюжок резисторів ($R_1 - R_{i+2}$) в мережі живлення електроду та ключі ($K_1 - K_{i+2}$), що їх комутують

Перевагою схеми з'єднання резистивів в ланцюжок, яка показана на рис. 1.3, є можливість включати до його складу ячейки з будь-яким опором. Перемикання ключів такої схеми дає можливість утворювати необхідну комбінацію з послідовно включених резистивних ячеек. Звісно, і в цьому випадку загальний опір ланцюжка дорівнює сумі використаних в структурі ланцюжка опорів ячеек.

Крім того, зображена на рис. 1.3 схема дає можливість істотно скоротити кількість ячеек в ланцюжку. Але для цього необхідно виважено здійснити вибір послідовності опорів ячеек, в залежності від того, яку характеристику регулювання опору ми маємо реалізувати. На нашу думку, для дослідження технологічних процесів оптимальною є реалізація лінійного закону зміни опору резистивного ланцюжка. Варіантом практичної реалізації цього закону може бути випадок, коли номінал опору окремих ячеек вибирають згідно поліному:

$$R_{\Sigma} = a_0 2^0 (1\Omega) + a_1 2^1 (1\Omega) + a_2 2^2 (1\Omega) + \dots + a_k 2^k (1\Omega) = (a_0 + 2a_1 + \dots + a_k 2^k) \Omega, \quad (1)$$

де $a_i \in [0; 1]$, тобто a_i приймає значення 0 або 1.

Досвід формування двокомпонентних покриттів вказує на те, що оптимальний крок зміни опору резистивного ланцюжка при відпрацюванні технологічного процесу становить 1 Ом незалежно від складу покриття та елемента генератора, з яким цей ланцюжок з'єднано. Отже опір кожної ячейки резистивного ланцюжка в нашому випадку бажано також мати кратним 1 Ом, або достатньо близьким до цієї величини. Тому одна з вимог до схеми з'єднання резисторів в ланцюжці полягає в тім, щоб опір окремої ячейки був кратним вказаному кроку зміни опору ланцюжка. Висловлюючись точніше, можна сказати, що опір окремої ячейки має відрізнятися від кроку зміни опору ланцюжка на величину стандартизованого відхилення. Це відхилення зазначене для відповідного ряду резисторів [19], який було обрано для створення ячеек ланцюжка.

Звідси стає очевидною необхідність використання саме ланцюжка резисторів, опір кожного з яких визначається заздалегідь. Причому, як зазначалося вище, не будь-яке з'єднання ячеек є доцільним. Зокрема, якщо з'єднувати резистори згідно зі схемою, яку показано на рис. 1.4, то для формування ланцюжка з опором близько 1000 Ом необхідно використати 1000 резисторів з опором в 1 Ом кожен. У той же час використання схеми ланцюжка, зображеної на рис. 1.3 і підбір опорів його ячеек згідно виразом (1.1) дозволяють отримати той же самий опір ланцюжка, використовуючи всього 10 ячеек, опір

яких відповідає послідовності: 1 Ом; 2 Ом; 4 Ом; 8 Ом; 16 Ом; 32 Ом; 64 Ом; 128 Ом; 256 Ом; 512 Ом.

Наведений приклад демонструє складність підбору потрібного опору ячеек ланцюжка резисторів, особливо зважаючи на те, що номінали існуючих резисторів відповідають рядам, зазначеним у стандарті ДСТУ ІЕС 60063:2015 [19].

Висновки

Обґрунтовано загальний підхід до вдосконалення системи живлення інверсної магнетронної розпорощувальної системи для формування багатокомпонентних покриттів. З метою апробації цього підходу здійснено формування двокомпонентного покриття з карбиду вольфраму. Запропоновано використовувати живлення всіх елементів технологічного генератора від одного джерела живлення. Для відпрацювання способу регулювання складу покриття до системи живлення введено регульовані резистивні ланцюжки. Визначено принцип підбору опору окремих ячеек в ланцюжці, що забезпечує скорочення їх кількості.

Створену систему живлення можливо використовувати при відпрацюванні принципів формування функціональних покриттів з великою кількістю компонентів, включаючи управління складом окремого покриття в процесі його формування.

Література

1. Иванов, В. Е. Кристаллизация тугоплавких металлов из газовой фазы [Текст] / В. Е. Иванов, Е. П. Нечипуренко, В. М. Криворучко, В. В. Сагалович. – Москва : Атомиздат, 1974. – 264 с.
2. Бельский, М. А. Электроосаждение металлических покрытий [Текст] : справочник / М. А. Бельский, А. Ф. Иванов. – М. : Металлургия, 1985. – 292 с.
3. Многокомпонентные диффузионные покрытия [Текст] / Л. С. Ляхович, Л. Г. Ворошин, Г. Г. Панич, Э. Д. Щербаков. – Минск : Наука и техника, 1974. – 288 с.
4. Технология тонких пленок [Текст] : справочник. Т. 1, 2 : пер. с англ. / под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга. – М. : Сов. радио, 1977. – 662 с.
5. Кудинов, В. В. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий [Текст] / В. В. Кудинов, В. М. Иванов. – М. : Машиностроение, 1981. – 192 с.
6. Мовчан, Б. А. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме [Текст] / Б. А. Мовчан, И. С. Малашенко. – Киев : Наук. думка, 1983. – 232 с.
7. Андреев, А. А. Вакуумно-дуговые покрытия [Текст] / А. А. Андреев, Л. П. Саблев, С. Н. Григорьев. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2010. – 318 с.
8. Данилин, Б. С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок [Текст] / Б. С. Данилин. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 328 с.
9. Movchan, B. A. High-Temperature Protective Coatings Produced by EB-PVD [Text] / B. A. Movchan, K. Yu. Yakovchuk // Journal of Coating Science and Technology. – 2014. – Vol. 1, No. 2. – P. 96 – 110.
10. Яковчук, К. Ю. Теплопроводность и термодолговечность конденсационных термобарьерных покрытий [Текст] / К. Ю. Яковчук // Современ. электрометаллургия. – 2014. – № 4. – С. 25 – 31.
11. О воспроизводимости однофазного структурного состояния многоэлементной высокоэнтропийной системы Ti-V-Zr-Nb-Hf и высокопрочных нитридов на ее основе при их формировании вакуумно-дуговым методом [Текст] / О. В. Соболев, А. А. Андреев, В. Ф. Горбань, Н. А. Крапивка, В. А. Столбовой, И. В. Сердюк, В. Е. Фильчиков [Текст] // Письма в ЖТФ. – 2012. – Том 38, вып. 13. – С. 41 – 48.
12. Термостабильность свойств нитридных покрытий на основе многокомпонентного высокоэнтропийного сплава системы Ti-V-Zr-Nb-Hf [Текст] / С. А. Фирстов, В. Ф. Горбань, Н. И. Даниленко, М. В. Карпец, А. А. Андреев, Е. С. Макаренко // Порошковая металлургия. – 2013. – № 9/10. – С. 93 – 102.
13. Growth (AlCrNbSiTiV)N thin films on the interrupted turning and properties using DCMS and HIP-IMS system [Text] / K. S. Chang, K. T. Chen, C. Y. Hsu, P. D. Hong // Applied Surface Science. – 2018. – Vol. 440. – P. 1 – 7.
14. Каблов, Е. Н. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД [Текст] / Е. Н. Каблов, С. А. Мубояджян // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 60 – 70.
15. Волхонский, А. О. Высокоэффективные износостойкие ионно-плазменные покрытия на основе пятикомпонентных нитридов для режущего твердосплавного инструмента, работающего в условиях постоянных нагрузок [Текст] / А. О. Волхонский, И. В. Блинков, А. В. Елютин, О. Б. Подстыжонко // Металлург. – 2010. – № 6. – С. 55 – 59.
16. Физико-технические основы создания плазменно-ионных источников и ускорителей для космических и технологических целей [Текст]: отчет о НИР (заключительный): Д402-28/2006-Ф / Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т»; рук. Колесник В. П.; исполн. Оранский А. И. [и др.]. – Х., 2008. – 300 с. – ДР 0106U001056.
17. Numerical simulation of abnormal glow discharge processes in crossed electric and magnetic fields [Text] / A. V. Isakov, V. P. Kolesnik, A. M. Okhrimovskyy, N. P. Stepanushkin, A. A. Taran // Problems of atomic science and technology. – 2014. – №6(94)(20). – Series : Plasma Physics (20). – P. 171 – 174.

18. Thornton, J. A. *Cylindrical Magnetron Sputtering [Text]* / J. A. Thornton, A. S. Penfold // *Thin film processes ; edited by J. L. Vossen, W. Kern. – Academic Press, 1978. – P. 76-110.*

19. ДСТУ ІЕС 60063:2015. Резистори та конденсатори. Ряди переважних чисел [Текст]. – На заміну ГОСТ 28884-90 (МЭК 63-63) ; чинний з 2016-01-01. – К. : Держспоживстандарт України, 2015. – 13 с.

References

1. Ivanov, V. E., Nechipurenko, E. P., Krivoruchko, V. M., Sagalovich, V. V. *Krystallizatsiya tugoplavkikh metallov iz gazovoi fazy* [Crystallization of refractory metals from the gas phase]. Moscow, Atomizdat Publ., 1974. 264 p.

2. Belen'kij, M. A., Ivanov, A. F. *Jelektroosazhdenie metallicheskikh pokrytij* [Electrodeposition of metallic coatings]. Moscow, Metallurgija Publ., 1985. 288 p.

3. Ljahovich, L. S., Voroshnin, L. G., Papich, G. G., Shherbakov, Je. D. *Mnogokomponentnye difuzionnye pokrytija* [Multicomponent diffusion coatings]. Minsk, Nauka i tehnika Publ., 1974. 288 p.

4. Majssela, L., Gljenga, R. *Thin film technology*, New York, 1970. 662 p. (Russ. ed. Elinson, M. I., Smolko, G. G. *Tehnologija tonkih plenok*. Vol. 1, 2. Moscow, «Sov. radio» Publ., 1977. 662 p.)

5. Kudinov, V. V., Ivanov, V. M. *Nanesenie plazmoj tugoplavkikh pokrytij* [Plasma coating of refractory coatings.]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 192 p.

6. Movchan, B. A., Malashenko, I. S. *Zharostojkie pokrytija, osazhdaemye v vakuume* [Heat-resistant coatings deposited in vacuum]. Kiev, Nauk. Dumka Publ., 1983. 232 p.

7. Andreev, A. A., Sablev, L. P., Grigor'ev, S. N. *Vakuumno-dugovye pokrytija* [Vacuum arc coating]. Kharkiv, NNC HFTI Publ., 2010. 317 p.

8. Danilin, B. S. *Primenenie nizkotemperaturnoj plazmy dlja nanesenija tonkih plenok* [The use of low-temperature plasma for the deposition of thin films]. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1989. 328 p.

9. Movchan, B. A., Yakovchuk, K. Yu. High-Temperature Protective Coatings Produced by EB-PVD. *Journal of Coating Science and Technology*, 2014, no. 1, pp. 96 – 110.

10. Jakovchuk, K. Ju. Teploprovodnost' i termociklicheskaja dolgovechnost' kondensacionnyh termobar'ernyh pokrytij [Thermal conductivity and thermal cyclic durability of condensation thermal barrier coatings]. *Sovrem. Jelektrometallurgija*, 2014, no. 4, pp. 25 – 31.

11. Sobol', O. V., Andreev, A. A., Gorban', V. F., Krapivka, N. A., Stolbovoj, V. A., Serdjuk, I. V., Fil'chikov, V. E. O vosproizvodimosti odnofaznogo strukturnogo sostojanija mnogojelementnoj vysokotverdyh

nitridov na ee osnove pri ih formirovanii vakuumnodugovym metodom [On the reproducibility of the single-phase structural state of the multi-element high-entropy system Ti – V – Zr – Nb – Hf and highly solid nitrides based on it during their formation by the vacuum-arc method]. *Zhurnal tehnichekoj fiziki*, 2012, vol. 38, no. 13, pp. 41 – 48.

12. Firstov, S. A., Gorban', V. F., Danilenko, N. I., Karpec, M. V., Andreev, A. A., Makarenko, E. S. Termostabil'nost' svojstv nitridnyh pokrytij na osnove mnogokomponentnogo splava Ti-V-Zr-Nb-Hf [Thermal stability of the properties of nitride coatings based on the multicomponent alloy Ti-V-Zr-Nb-Hf]. *Poroshkovaja metallurgija*, 2013, no. 9/10, pp. 93 – 102.

13. Chang, K. S., Chen, K. T., Hsu, C. Y., Hong, P. D. Growth (AlCrNbSiTiV)N thin films on the interrupted turning and properties using DCMS and HIPIMS system. *Applied Surface Science*, 2018, vol. 440, pp. 1 – 7.

14. Kablov, E. N., Mubojadzhan, S. A. Zharostojkie i teplozashhitnye pokrytija dlja lopatok turbin visokogo davlenija perspektivnyh GTD [Heat-resistant and heat-shielding coatings for low-viscose high-pressure turbines of promising GTE]. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 5, pp. 60 – 70.

15. Volhovskij, A. O., Blinkov, I. V., Eljutin, A. V., Podstjazhonok, O. B. Vysokojeffektivnye iznosostojkie ionno-plazmennye pokrytija dlja rezhushhego tverdosplavnogo instrumenta, rabotajushhego v usloviyah postojannyh nagruzok [High-performance wear-resistant ion-plasma coatings for carbide cutting tools operating under constant load conditions]. *Metallurg*, 2010, no. 6, pp. 55 – 59.

16. Fiziko-tehnicheskie osnovy sozdanija plazmenno-ionnyh istochnikov i uskoritelej dlja kosmicheskikh i tehnologicheskikh celej [Physical and technical basis for creating plasma-ion sources and accelerators for space and technological purposes]. Otchet o NIR (zakljuchitel'nyj): Д402-28/2006-Ф / Nac. ajerokosm. un-t «Har'k. aviac. in-t» ; ruk. Kolesnik V. P.; ispoln. Oranskij A. I. [i dr.]. Kharkiv, 2008. 300 p. ДР 0106U001056.

17. Isakov, A. V., Kolesnik, V. P., Okhrimovskyy, A. M., Stepanushkin, N. P., Taran, A. A. Numerical simulation of abnormal glow discharge processes in crossed electric and magnetic fields. *Problems of atomic science and technology*, 12/2014, no. 6(94)(20), pp. 171 – 174.

18. Thornton, J. A. Penfold A. S. *Cylindrical Magnetron Sputtering*. Thin film processes. Academic Press, 1978, pp. 76-110.

19. DSTU ІЕС 60063:2015. Резистори та конденсатори. Ряди переважних чисел [State Standard 60063:2015. Resistors and capacitors. Rows of preferential numbers]. Kyiv, Derzhspozhivstandart Ukraini Publ., 2016. 13 p.

Поступила в редакцію 4.02.2019, рассмотрена на редколлегии 12.06.2019

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ИНВЕРСНОЙ МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ (СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ РАСПЫЛЕНИЯ И ЕГО ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ)

*Л. В. Литовченко, В. П. Колесник, О. Н. Чугай, А. А. Бояркин,
Д. В. Слюсар, Н. П. Степанушкин, С. В. Олейник*

На основе анализа литературных данных о способах обеспечения необходимого ресурса деталей машин и механизмов показана необходимость применения в машиностроении функциональных покрытий, которые могут образовываться многими слоями и иметь в своем составе целый ряд компонентов. Существующие технологии и соответствующее оборудование требуют предварительного изготовления сплавов, из которых формируются покрытия. Это существенно ограничивает управления составом покрытий. Показано преимущество над существующими ионно-плазменных технологий, разработанных в Национальном аэрокосмическом университете им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». В частности, благодаря распылению большого количества катодов-мишеней эти технологии позволяют формировать многокомпонентные покрытия практически любого состава. При реализации ионно-плазменных технологий формирования покрытий определяющую роль играет генератор потока частиц материала покрытия. С целью совершенствования системы электропитания такого генератора предложено осуществлять подачу напряжения к каждому элементу генератора через цепочку резисторов, общее сопротивление которой регулируется системой управления соответствующей программой. Такой подход к совершенствованию системы электропитания технологического генератора материала покрытия воплощен в жизнь в разработанной лабораторной опытно-промышленной технологической установке для формирования модельного покрытия из карбида вольфрама. Рассмотрены две возможные схемы создания резистивных цепочек, сопротивление которых регулируется. Выбрана схема, которая состоит из меньшего количества элементов. Установлена важная роль любой резистивной цепочки в функционировании системы управления технологическим генератором. Предложен оптимальный вариант выбора номиналов сопротивлений резисторов, входящих в состав цепочки. Проведенный авторами анализ экспериментальных данных свидетельствует о том, что каждая такая цепочка должна иметь индивидуальные особенности, в частности, границы и шаг изменения сопротивления, максимальную мощность тепловых потерь. Эти и другие параметры, как правило, определяются экспериментально.

Ключевые слова: ионно-плазменные технологии; системы электропитания; системы управления; многокомпонентные покрытия; карбид вольфрама.

FEATURES OF CONSTRUCTION OF POWER SUPPLY SYSTEM OF THE INVERSE MAGNETRON SPUTTERING SYSTEMS FOR THE FORMATION OF MULTICOMPONENT COATINGS (CONTROL METHOD OF DISTRIBUTION PROCESS AND ITS PRACTICAL REALIZATION)

*L. V. Litovchenko, V. P. Kolesnik, O. N. Chugai, A. O. Boyarkin,
D. V. Slusar, N. P. Stepanushkin, S. V. Olyinik*

It's shown the necessity to use functional coatings in engineering, which can be formed in many layers and contain a number of components what based on the analysis of literature data about ways to ensure the required resource of machine parts and mechanisms. Existing technologies and the corresponding equipment require the pre-fabricating of the alloys which the coatings are formed. This significantly limits the control of the coatings' composition. It's shown the advantage of ion-plasma technologies developed at National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute" over the existing technologies. In particular, due to the spraying of a large number of cathodes-targets, these technologies allow the formation of multicomponent coatings of almost any composition. When implementing ion-plasma technology for the formation of coatings, a decisive role plays the generator of the flow of particles of the coating material. It has been proposed to supply voltage to each generator element through a chain of resistors, the total resistance of which is regulated by the control system of the corresponding program to improve the power supply system of such a generator. Such an approach to the improvement of the power supply system of the technological generator of the coating material is implemented in the developed laboratory experimental-industrial process plant for the formation of a model coating of tungsten carbide. It was considered two possible schemes for creating resistive chains with regulated resistance. It was selected the scheme, which consists of a smaller number of elements. The important role of any resistive chain in the operation of the technological generator control system has been determined. It was proposed the optimal choice of the nominal values of the resistors included in the chain. The optimal choice of the nominal values of the resistors included in the chain has been pro-

posed. The conducted analysis of experimental data carried out by the authors suggests that each such chain should have individual features, in particular, the boundaries and the step of resistance, the maximum power of heat losses. These and other parameters are usually determined experimentally.

Keywords: ion-plasma technology; power supply systems; control systems; multi-component coatings; tungsten carbide.

Литовченко Леонід Васильович – канд. техн. наук, доцент, ст. наук. співр. каф. 402, Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Колесник Володимир Петрович – канд. техн. наук, доцент, начальник НДЧ, Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Чугай Олег Миколайович – д-р техн. наук, професор, професор каф. 505, Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Бояркін Андрій Олександрович – ст. викл. каф. 305, Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Слюсар Денис Віталійович – канд. техн. наук, ст. наук. співр. каф. 402, Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Степанушкін Микола Петрович – ст. наук. співр. каф. 402, Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Олійник Сергій Володимирович – канд. техн. наук, доц. каф. 505, Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Litovchenko Leonid Vasilevich – PhD, Associate Professor, Senior Research Officer at the Department of 402, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: papalv@i.ua, ORCID Author ID: 0000-0001-7358-1465.

Kolesnik Volodimir Petrovich – PhD, Associate Professor, Head of the Scientific and Research Department, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: v.kolesnik@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0002-3602-1562.

Chugai Oleg Mikolaevich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor at the Department of 505, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: chugai@xai.edu.ua, ORCID Author ID: 0000-0002-2857-6592, Scopus Author ID: 6602397105.

Boyarkin Andriy Oleksandrovich – Senior Lecturer at the Department of 305, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: k305@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0003-3210-1482.

Slusar Denis Vitalyevich – PhD, Senior Research Officer at the Department of 402, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: dv_slusar@yahoo.co.uk, ORCID Author ID: 0000-0002-8314-6587.

Stepanushkin Mikola Petrovich – Senior Research Officer at the Department of 402, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: k402@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0002-7016-8445.

Oliynik Sergiy Volodimirovich – PhD, Associate Professor of Department of 505, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: oleynick1981@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0001-6073-8531, Scopus Author ID: 8404643500.