

УДК 621.793.74.08

doi: 10.32620/aktt.2020.2.02

Ю. О. СИСОЄВ

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна*

## УПРАВЛІННЯ СКЛАДОМ ПЛАЗМОВОГО ПОТОКУ ВАКУУМНО-ДУГОВИХ ДЖЕРЕЛ

*Розглянуто питання управління кількістю крапельної фракції в плазмовому потоці технологічних вакуумно-дугових джерел плазми контрольованою зміною температури робочої поверхні катода. Таке управління температурою робочої поверхні катода дозволяє отримувати покриття відповідно до функціональних вимог до них як з мінімальним, так і з максимальним вмістом крапельної фракції. Визначено, що параметрами, які впливають на температуру робочої поверхні катода, в загальному випадку є: цілісність теплового потоку, що надходить з розряду на робочу поверхню катода; тепловий опір катода, якій визначається відстанню між робочою поверхнею катода і зоною його охолодження; температура охолоджувальної поверхні катода. Досліджено можливості та особливості регулювання і стабілізації температури робочої поверхні катода з охолодженням його як по торцевій, так і по бічній поверхні. У запропонованій конструкції джерела плазми з охолодженням катода по торцевій поверхні обмежено регулювання температури робочої поверхні катода зміною температури охолоджуваного торця; більше широке регулювання можна здійснювати струмом дугового розряду; застосування контролю температури охолоджуючої рідини з одночасним регулюванням її витрати через зону охолодження дозволяє істотно знизити експлуатаційні витрати. Джерело плазми з охолодженням катода по боковій поверхні дозволяє змінювати температуру робочої поверхні катода в широкому діапазоні шляхом зміни відстані між робочою поверхнею катода і зоною його охолодження; стабілізація заданої температури робочої поверхні катода здійснюється підтриманням встановленої відстані між робочою поверхнею катода і зоною його охолодження на постійному рівні переміщенням катода зі швидкістю, що дорівнює швидкості випаровування матеріалу на робочій поверхні катода. У цій конструкції можлива зміна температури робочої поверхні катода безпосередньо в ході процесу напilenня шляхом зміни відстані між робочою поверхнею катода і початком зони його охолодження за попередньо заданою програмою.*

**Ключові слова:** вакуумна дуга; іонно-плазмові технології; крапельна фаза вакуумно-дугового розряду; температура робочої поверхні катода; зона охолодження катода.

### Вступ

Плазмові потоки, які генеруються катодною плямою вакуумно-дугового розряду, знайшли широке практичне застосування. Вони використовуються для отримання покриттів різного призначення: зносостійких, жароміцних, антифрикційних, корозійностійких, оптичних [1-4], покриттів з гетерними властивостями [5] тощо. Галузі застосування таких покриттів дуже різні – це авіаційно-космічна техніка, атомна енергетика, приладобудування та ін.

Як показано в роботах [2, 6], плазмовий потік вакуумної дуги містить в своєму складі значну кількість мікрокраплинної фракції. Ці мікрокраплі (МК) багато в чому визначають якісні характеристики покриттів. У багатьох випадках наявність МК в плазмовому потоці є небажаним, і їх усувають, пропускаючи плазмовий потік через сепаруючі пристрої. В інших випадках, навпаки, потрібна наявність в складі потоку великої кількості МК. Такими випадками є отримання гетерних покриттів [5] і малорозмірних порошків матеріалу катода [7].

Кількість МК в плазмовому потоці при інших рівних умовах визначається температурою робочої поверхні катода. Змінюючи її можна управляти в певному діапазоні вмістом МК у потоці, що осаджується. Можливість управління складом плазмового потоку розширює технологічні можливості джерел плазми.

Метою роботи є дослідження можливості зміни температури робочої поверхні катода в процесі роботи джерела плазми, і розробка конструкцій джерел плазми з керованим складом створюваного плазмового потоку.

### 1. Аналіз стану питання

Дослідження впливу температури катода на характеристики плазми, що генерується стаціонарним вакуумно-дуговим розрядом, виконане в [8], показало, що зміна температури катода приводить до зміни змісту МК в плазмовому потоці.

Вочевидь, що така зміна параметрів плазмового

поток неминуче буде впливати на склад і характеристики одержуваних покриттів. Для забезпечення відтворюваності властивостей покриттів потрібно сталість складу потоку, що осаджується.

Дослідження ерозії катода вакуумного дуги в залежності від температури катода, обумовленою режимом його охолодження, виконано в [2]. Було встановлено збільшення коефіцієнта електропереносу матеріалу катода  $\mu$  в кілька разів при погіршенні умов охолодження. В роботі [9] було звернено увагу на те, що  $\mu = \mu_i + \mu_n$ , де  $\mu_i$  характеризує втрати маси за рахунок іонів, а  $\mu_n$  – за рахунок нейтральної компоненти (парів і МК). Оскільки  $\mu_i$  не залежить ні від струму розряду, ні від часу його горіння, то зміна  $\mu$  від даних параметрів визначається тільки  $\mu_n$ .

У більшості конструкцій джерел плазми існуючих іонно-плазмових установок (Булат, ННВ та ін.) у процесі роботи відбувається постійне зменшення довжини стрижневого катода, що еквівалентно зменшенню його теплового опору. Оскільки при цьому температура неробочого торця катода практично не змінюється, то відбувається відповідне зменшення температури робочої поверхні катода. Дана обставина призводить до того, що склад плазмового потоку джерела плазми спочатку експлуатації катода і в його кінці значно різняться.

В [10] для отримання покриттів з відтвореним складом запропоновано між процесами наплення здійснювати періодичне зменшення діаметра канавки в тілі катода поблизу його охолоджувальної поверхні. Цим самим забезпечується компенсація зміни теплового опору катода в міру його вироблення і досягається підтримання температури його робочої поверхні в певному діапазоні від циклу до циклу нанесення покриттів. Основним недоліком такого підходу є необхідність виконання складної операції розбирання-збирання джерела плазми після кожного циклу обробки, що знижує продуктивність процесу.

З метою збільшення запасу матеріалу катода в [11] запропоновано використовувати охолодження катода по боковій поверхні, а сам катод переміщати зі швидкістю його випаровування. У цьому випадку можливе забезпечення стабільної температури робочої поверхні катода, і, як наслідок, плазмового потоку з постійним вмістом крапельної фракції в часі. Зміна температури робочої поверхні катода в такій конструкції джерела плазми не передбачено.

## 2. Результати досліджень

### 2.1. Джерело плазми з охолодженням катода по торцевій поверхні

В процесі роботи джерела плазми на робочу поверхню катода надходить тепловий потік  $Q$ , який

внаслідок обходу катодною плямою (КП) всієї поверхні робочого торця за час  $\sim 10^{-2} - 10^{-1}$  с [8], можна вважати розподіленим рівномірно (рис. 1). За умови, що бокова поверхня катода адіабатична, то весь потік  $Q$  відводиться охолоджувальною рідиною з витратою  $q$  через неробочий торець катода.

Величина  $Q$  визначається часткою енергії розряду, що виділилася на катоді. Відомо, що в дуговому розряді співвідношення енергій  $P_a/P_k$ , що виділяються на аноді  $P_a$  і катоді  $P_k$ , може бути як більше, так і менше одиниці, і визначається безліччю факторів (вид і тиск газу, струм розряду, його тривалість та ін. [12]). У першому наближенні можна вважати  $P_a = P_k$ , а втрати енергії на випромінювання рівними близько 20% від загальної потужності розряду.

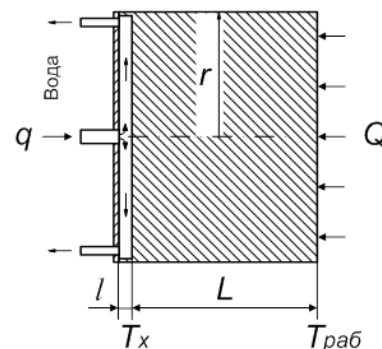


Рис. 1. Теплові потоки на торцях катода вакуумно-дугового розряду при роботі джерела плазми

При роботі джерела плазми в певному режимі  $Q = \text{const}$ , відповідно, щільність теплового потоку  $q_c = Q/S_c$ , де  $S_c$  – площа робочої поверхні катода, також постійна. З теорії теплопровідності випливає:

$$q_c = (T_{\text{роб}} - T_x) R_t \quad (1)$$

де  $T_{\text{роб}}$  – температура робочої поверхні катода;  $T_x$  – температура його охолоджувальної поверхні;  $R_t$  – термічний опір катода, рівний  $R = L/\lambda$ , де  $L$  – довжина катода;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу катода.

В існуючих конструкціях джерел плазми зі стрижневим катодом зменшення довжини катода  $L$  призводить до зменшення його теплового опору  $R_t$  і, відповідно до (1), при  $q_c = \text{const}$  зменшення перепаду температур  $T_{\text{роб}} - T_x$ . Так як температура охолоджувальної поверхні  $T_x$  практично постійна, то буде змінюватися температура робочої поверхні катода  $T_{\text{роб}}$ . Зафіксувати  $T_{\text{роб}}$  можна одним із способів:

– збільшенням температури охолоджувальної поверхні катода  $T_x$  при постійному значенні  $q_c$ ;

– збільшенням теплового потоку  $Q$  на робочу поверхню катода при незмінній температурі його охолоджуваного торця  $T_x$ .

Перший метод обмежений діапазоном можливої зміни температури охолоджуючої рідини, яка визначає температуру охолоджувальної поверхні катода  $T_x$ , і який в разі використання води зазвичай лежить в межах  $\sim 293 - 353$  °K. Нижня межа діапазону тут обумовлена температурою води, що йде на охолодження, верхня – робочою температурою матеріалу ущільнювачів (так, вакуумна гума марки 9024 (чорна) має максимальну робочу температуру  $80^\circ\text{C}$  [13]). У будь-якому випадку, цей діапазон набагато менше діапазону зміни температури робочої поверхні катода  $T_{\text{роб}}$  внаслідок зміни теплового опору  $R_t$ .

Другий спосіб має більш широкі можливості і пов'язаний з підвищенням потужності вакуумно-дугового розряду  $P$ . Ця потужність визначається як  $P = U \cdot I$ , де  $U$  – напруга розряду;  $I$  – струм дуги. Оскільки напруга на дузі мало змінюється при збільшенні її струму, то збільшення енергії, що виділяється в розряді, можна досягти збільшенням струму дугового розряду. Діапазон зміни струму  $I$  обмежений знизу мінімальним струмом існування КП вакуумної дуги, зверху – можливостями джерела живлення розряду і системи охолодження джерела плазми. На діапазон зміни струму розряду обмеження можуть накладатися вимогами технологічного процесу.

На рис. 2 показана конструкція джерела плазми з модернізованим катодним вузлом з охолодженням катода по торцевій поверхні. Основною відмінністю такого вузла є контроль над температурою охолоджуючої рідини, що здійснюється за допомогою датчиків 12 і 13. Сигнал з датчика 13 про температуру води на виході системи охолодження дозволяє стабілізувати цю температуру на заданому рівні шляхом регулювання витрати води за допомогою клапана 6, керованого ПІД-регулятором в блоці управління 9.

Представлена на рис.2 конструкція системи охолодження катода має обмежені можливості по управлінню температурою його робочої поверхні, пов'язані з малим діапазоном зміни температури поверхні катода  $T_x$ . При збільшенні температури робочої поверхні катода за рахунок струму дугового розряду, зростає тепловий потік на катод в даній конструкції відводиться системою охолодження шляхом підвищення витрати охолоджуючої рідини.

Слід відзначити високу ефективність застосування контролю температури охолоджуючої рідини з одночасним регулюванням її витрати через зону охолодження для зниження експлуатаційних витрат. Застосування такої системи дозволяє в початковий момент роботи джерела плазми не здійснювати витрати охолоджуючої рідини, що знижує її споживання і прискорює вихід катода на робочий режим. Графіки,

що ілюструють зміни температури охолоджуючої рідини  $T$  і її витрати  $q$  при роботі джерела плазми на даному принципі, наведені на рис. 3. Невелике зменшення витрати охолоджуючої рідини  $q$  в процесі роботи джерела плазми в одиничному циклі напilenня пов'язано з необхідністю збільшення температури поверхні катода  $T_x$  при постійному значенні  $q_c$ .

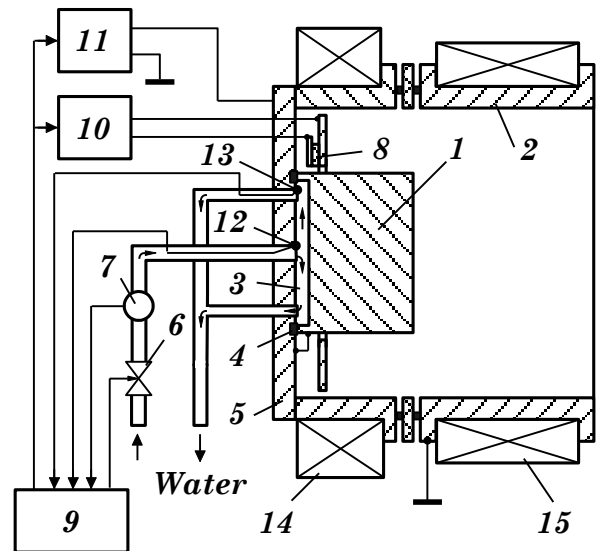


Рис. 2. Джерело плазми з контролем температури в зоні охолодження катода: 1 – катод; 2 – анод; 3 – зона охолодження; 4 – ущільнення; 5 – фланець; 6 – керований клапан; 7 – лічильник води; 8 – підпал; 9 – система управління; 10 – блок живлення; 11 – блок підпалу; 12, 13 – термопари; 14, 15 – соленоїди

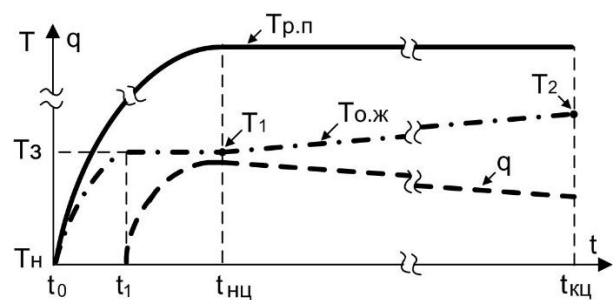


Рис. 3. Характер зміни температури охолоджуючої рідини  $T_{o.ж}$  і її витрати  $q$  при роботі джерела плазми при відсутності початкової витрати

Час  $t_1$  (рис. 3) для катода джерела плазми установки «Булат-6» при його прогріванні до  $353$  °K дорівнює  $21$  с. Затримка подачі охолоджуючої рідини на цей час дозволяє при реалізації процесу тривалістю в  $1800$  с при двозмінній роботі економити в рік близько  $16200$  л охолоджуючої рідини тільки для одного джерела плазми установки.

### 2.1. Джерело плазми з охолодженням катода по бічній поверхні

Ширші можливості по управлінню температурою робочої поверхні катода відкриваються при організації його охолодження по боковій поверхні. В цьому випадку, при зменшенні теплового опору катода  $R_t$  за рахунок його вироблення, легко здійснити відновлення значення  $R_t$  шляхом переміщення катода. Таке постійне переміщення забезпечує довжину між робочою поверхнею катода і зоною його охолодження незмінною.

Джерело плазми з охолодженням катода по боковій поверхні представлено на рис. 4.

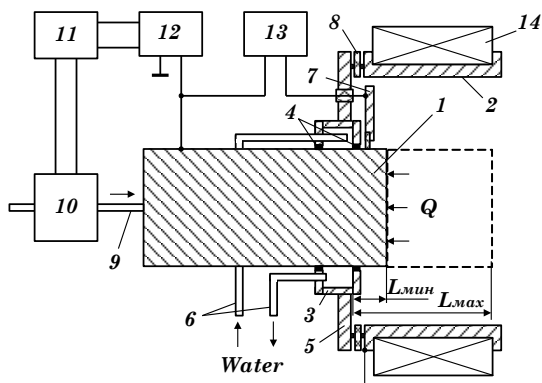


Рис. 4. Джерело плазми з охолодженням катода по бічній поверхні: 1 – катод; 2 – анод; 3 – зона охолодження; 4 – ущільнення; 5 – фланець; 6 – патрубки; 7 – підпал; 8 – ізолятор; 9 – шток; 10 – привід; 11 – система управління; 12 – блок живлення; 13 – блок підпалу; 14 – соленоїд

Температуру робочої поверхні катода  $T_{роб}$  в джерелі плазми даної конструкції можна змінювати в діапазоні  $T_{min} \div T_{max}$ . Її ставлять відстанню  $L$  між робочою поверхнею катода і зоною його охолодження. Це відстань може змінюватися в діапазоні  $L_{min} \leq L < L_{max}$ . Мінімальна відстань між робочою поверхнею катода і початком зони його охолодження  $L_{min}$  визначається конструкцією катодного вузла джерела плазми, зокрема, способом підпалу дуги. У загальному випадку максимальна відстань між робочою поверхнею катода і початком зони його охолодження  $L_{max}$  для катодів з легкоплавких матеріалів обмежується умовою  $T_{роб} < T_m$ , де  $T_m$  – температура плавлення матеріалу катода. У разі катодів з тугоплавких матеріалів  $L_{max}$  обмежується умовою  $T_{роб} < T_t$ , де  $T_t$  – температура поверхні катода, при якій відбувається перехід дугового розряду в термоемісійний режим.

При температурі робочої поверхні катода  $T_{min}$  у плазмовому потоці міститься мінімальна кількість МК. Зі збільшенням відстані між робочою поверхню

катода і початком зони його охолодження  $L$  температура робочої поверхні катода також збільшується з відповідним збільшенням кількості МК плазмовому потоці. Максимальна кількість крапель в потоці міститься при відстані між робочою поверхню катода і початком зони його охолодження  $L_{max}$ , коли досягається максимальне значення  $T_{роб}$ . Таким чином, змінюючи відстань між робочою поверхнею катода і зоною його охолодження, можна задавати температуру робочої поверхні катода і, відповідно, зміст МК в плазмовому потоці.

У процесі роботи джерела плазми з охолодженням катода по боковій поверхні для підтримки температури робочої поверхні катода на постійному рівні необхідно витримувати відстань між робочою поверхню катода і початком зони його охолодження незмінним. Це можливо при переміщенні катода зі швидкістю, що дорівнює швидкості його ерозії.

Кількість матеріалу катода  $m$ , який випаровується у вакуумній дузі, визначається як

$$m = \mu \cdot I \cdot t \quad (2)$$

де  $t$  – час існування розряду. Враховуючи, що винесення маси відбувається з робочої поверхні катода площею  $S$ , виготовленого з матеріалу щільністю  $\rho$ , за час  $t$  відбудеться випаровування шару катода величиною  $\Delta L$ . Тоді з (2)  $\Delta L$  дорівнює

$$\Delta L = \frac{\mu \cdot I \cdot t}{S \cdot \rho} \quad (3)$$

З (3) швидкість випаровування матеріалу катода  $V$  визначається як

$$V = \frac{\mu \cdot I}{S \cdot \rho} \quad (4)$$

Швидкість випаровування матеріалу катода  $V$ , що визначається із залежності (4), буде різною при різних температурах робочої поверхні катода в зв'язку зі зміною коефіцієнта електропереносу  $\mu$ . За експериментальними даними, наведеними в [2], значення  $\mu$  в залежності від охолодження катода, тобто температури робочої поверхні катода, змінюється більш ніж в чотири рази (від 39 до 210 мкг/Кл). Звідси випливає, що при різних відстанях між робочою поверхнею катода і початком зони його охолодження  $L$ , для забезпечення  $L = \text{const}$  швидкість переміщення катода повинна бути також різною – меншою при  $L_{min}$  і більшою при  $L_{max}$ .

Якщо при певній відстані  $L$  швидкість переміщення катода не буде їй відповідати, то відбудеться зміна відстані  $L$  до значення, при якому швидкість

ерозії і швидкість переміщення зрівнюються. Ця обставина може служити критерієм правильності завдання значення  $\mu$  при визначенні швидкості переміщення катода по залежності (4).

Слід зазначити також таку обставину. Зі збільшенням температури робочої поверхні катода нелінійно зростають втрати на випромінювання з робочою і бічних поверхонь катода, які стають істотними при температурі в кілька сотень градусів. Тому, а також внаслідок збільшення площі бічної поверхні з ростом відстані  $L$ , залежність  $T_{po} = f(L)$  є нелінійною.

За допомогою джерела плазми конструкції по рис. 4 були проведені дві серії експериментів отримання покриттів: з мінімальним вмістом МК при  $L_{min} = 10^{-2}$  м і з максимальним при  $L_{max} = 7 \cdot 10^{-2}$  м. Такі значення відстаней  $L$  відповідають коефіцієнтам електропереносу титанового катода  $\mu = 37$  мкг/Кл при  $L = 10^{-2}$  м і  $\mu = 148$  мкг/Кл при  $L = 7 \cdot 10^{-2}$  м [2].

Переміщення катода в циклах отримання покриттів здійснювали за допомогою штока 9 (рис. 4), що приводиться в рух кроковим приводом 10. Швидкість переміщення катода  $l$  визначалася з умови (4) в системі управління приводом 11, куди попередньо заносили дані: площа робочої поверхні катода  $S$ , коефіцієнт електропереносу матеріалу катода  $\mu$  і його щільність  $\rho$ . Сигнал про величину струму вакуумно-дугового розряду  $I$  надходив з виходу блоку живлення дуги 12. Час нанесення покриттів на пластинки зі сталі Х18Н9Т розміром 20x20x2 мм був 30 хв.

Швидкість переміщення катода відповідала 2,5 мкм за 10 с при  $L = 10^{-2}$  м і 10 мкм за 10 с при  $L = 7 \cdot 10^{-2}$  м. Після напрацювання катода в 2,5 години в кожній серії виміри показали, що попередньо встановлені відстані між робочою поверхню катода і зоною його охолодження  $L_{min}$  не змінилися.

Зразки, оброблені в різних режимах, досліджувалися за допомогою електронного мікроскопа РЕМ-106. Покриття на зразках, отримані при відстані між робочою поверхню катода і початком зони його охолодження  $L = 10^{-2}$  м характеризуються низькою шорсткістю поверхні, яка обумовлена невеликою кількістю МК. Покриття на зразках, отримані при відстані між робочою поверхню катода і зоною його охолодження  $L = 7 \cdot 10^{-2}$  м мають яскраво виражену шорсткість через великої кількості присутніх на поверхні МК. Поперечні шліфи для обох партій зразків показали однорідність складу покриттів по товщині.

## Висновки

Отримані в даній роботі результати можна узагальнити наступним чином:

– зміну кількості крапельної фракції в складі плазмового потоку вакуумно-дугового джерела плазми можна здійснювати шляхом зміни температури

робочої поверхні катода;

– параметрами, що визначають температуру робочої поверхні катода, в загальному випадку є: щільність теплового потоку, що надходить з розряду на робочу поверхню катода; тепловий опір катода, який визначається відстанню між робочою поверхню катода і зоною його охолодження; температура охолоджувальної поверхні катода;

– в конструкції джерела плазми з охолодженням катода по торцевій поверхні може бути обмежено регулювання температури робочої поверхні катода зміною температури охолоджуваного торця, а більш ширша здійснюється струмом дугового розряду; застосування контролю температури охолоджуючої рідини з одночасним регулюванням її витрати через зону охолодження дозволяє істотно знизити експлуатаційні витрати;

– джерело плазми з охолодженням катода по боковій поверхні дозволяє змінювати температуру робочої поверхні катода в широкому діапазоні шляхом зміни відстані між робочою поверхню катода і зоною його охолодження; стабілізація заданої температури робочої поверхні катода здійснюється підтриманням встановленої відстані між робочою поверхню катода і зоною його охолодження на постійному рівні переміщенням катода зі швидкістю, що дорівнює швидкості випаровування матеріалу на робочій поверхні катода;

– в джерелі плазми з охолодженням катода по боковій поверхні можлива зміна температури робочої поверхні катода безпосередньо в ході процесу напilenня шляхом зміни відстані між робочою поверхню катода і початком зони його охолодження за попередньо заданою програмою.

## Литература

1. Андреев, А. А. Вакуумно-дуговые покрытия / А. А. Андреев, Л. П. Саблев, С. Н. Григорьев. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2010. – 317 с.

2. Вакуумная дуга: источники плазмы, осаждение покрытий, поверхностное модифицирование / И. И. Аксенов, А. А. Андреев, В. А. Белоус и др. – Киев : Наукова думка, 2012. – 727 с.

3. Костюк, Г. И. Научные основы создания высокоэнтропийных нитридных, карбидных, боридных и оксидных нанопокрований на твердом сплаве Т12А / Г. И. Костюк, Ю. А. Сысоев, О. М. Мелкозерова // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2017. – Вып. 75. – С. 121–131.

4. Wainstein, D. Tribooxidation as a Way to Improve the Wear Resistance of Cutting Tools / D. Wainstein, A. Kovalev // Coatings. – 2018. – Vol. 8, Iss. 223. – 9 p.

5. Kuznezov, V. G. *Influence of Thermal Cathode Mode on Properties of Coatings Deposited from Metal Plasma of Vacuum-Arc Discharge* / V. G. Kuznezov, A. A. Lisenkov, V. A. Pavlova // *Plasma Devices and Operations*. – 2002. – Vol. 10, Iss. 3. – P. 179-186.

6. Anders, A. *Cathodic Arcs – From Fractal Spots to Energetic Condensation* / A. Anders. – Springer, 2008. – 540 p.

7. Пат. 2395369 РФ, МПК В22 F9/12. *Способ получения мелкодисперсных порошков* / А. А. Лисенков, В. Т. Барченко, В. Д. Гончаров и др. ; Заявитель и патентообладатель ИПМ РАН. – № 2008128362/02 ; заявл. 18.09.2008 ; опублик. 27.07.2010.

8. *Исследование плазмы стационарного вакуумно-дугового разряда. II. Влияние интегральной температуры катода* / И. И. Аксенов, В. Г. Брень и др. // *ТВТ*. – 1983. – Т. 21. – № 4. – С. 646–651.

9. Daalder, J. E. *Erosion and the origin of charged and neutral species in vacuum arcs* / J. E. Daalder // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 1975. – Vol. 8. – P. 1647-1659.

10. Пат. 2361014 РФ, МПК C23 C14/40. *Способ вакуумно-дугового нанесения покрытий* / В. Г. Кузнецов, А. А. Лисенков ; Заявитель и патентообладатель ИПМ РАН. – № 2007141668/02 ; заявл. 06.11.2007 ; опублик. 21.07.2009.

11. Pat. US 3625848 A Int. Cl. C23C14/32. *Arc deposition process and apparatus* / A. A. Snaper ; заявл. 26.12.1968 ; опублик. 7.12.1971.

12. Фролов, В. В. *Теория сварочных процессов* / В. В. Фролов. – М. : Высшая школа, 1988. – 559 с.

13. Плисковский, В. Я. *Конструкционные материалы и элементы вакуумных систем* / В. Я. Плисковский. – М. : Машиностроение, 1978. – 64 с.

## References

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

2. Aksenov, I. I., Andreev, A. A., Belous V. A., Strel'nickij, V. E., Horoshih, V. M. *Vakuumnaja duga: istochniki plazmy, osazhdenie pokrytij, poverhnostnoe modifitsirovanie* [Vacuum arc: plasma sources, the deposition of coatings, surface modification]. Kiev, Naukova dumka Publ., 2012. 727 p.

3. Kostjuk, G. I., Sysoev Ju. A., Melkozerova, O. M. *Nauchnye osnovy sozdaniya vysokojentropijnyh nitridnyh, karbidnyh, boridnyh i oksidnyh nanopokrytij na tverdom splave T12A* [Scientific basis for the creation of highly entropic nitride, carbide, boride and oxide nanocoatings on T12A alloy] *Sb. nauch. tr. «Otkrytye informacionnye i komp'juternye integrirovannye tehnologii»*. Kharkiv, Nac. ajerokosm. un-t «HAI». 2017, no. 75, pp. 121-131.

4. Wainstein, D., Kovalev, A. *Tribooxidation as a Way to Improve the Wear Resistance of Cutting Tools*. *Coatings*, 2018, vol. 8, iss. 223. 9 p.

5. Kuznezov, V. G., Lisenkov, A. A., Pavlova, V. A. *Influence of Thermal Cathode Mode on Properties of Coatings Deposited from Metal Plasma of Vacuum-Arc Discharge*. *Plasma Devices and Operations*, 2002, vol. 10, iss. 3, pp. 179-186.

6. Anders, A. *Cathodic Arcs – From Fractal Spots to Energetic Condensation*. Springer Publ., 2008. 540 p.

7. Lisenkov, A. A., Barchenko, V. T., Goncharov, V. D., Goncharov, S. V., Skachek, I. G. *Sposob poluchenija melkodispersnyh poroshkov* [The method of obtaining fine powders]. Patent RF, no. 2395369, 2006.

8. Aksenov, I. I., Bren', V. G., Kononov I. I., Sysoev, Ju. A. *Issledovanie plazmy stacionarnogo vakuumno-dugovogo razrjada. II. Vlijanie integral'noj temperatury katoda* [Investigation of a plasma of a stationary vacuum-arc discharge. II. The effect of the integrated temperature of the cathode]. *High Temperature*, 1983, vol. 21, no. 4, pp. 646-651.

9. Daalder, J. E. *Erosion and the origin of charged and neutral species in vacuum arcs*. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1975, vol. 8, pp. 1647-1659.

10. Kuznecov, V. G., Lisenkov, A. A. *Sposob vakuumno-dugovogo nanesenija pokrytij* [Vacuum arc coating method]. Patent RF, no. 2361014, RU, 2006.

11. Snaper, A. A. *Arc deposition process and apparatus*. Patent US, no. 3625848 A Int. Cl. C23C14/32, 1971.

12. Frolov, V. V. *Teorija svarochnykh processov* [The theory of welding processes]. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 1988. 559 p.

13. Pliskovskij, V. Ja. *Konstrukcionnye materialy i jelementy vakuumnyh sistem* [Structural materials and vacuum systems components]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 64 p.

Надійшла до редакції 19.03.2020, розглянута на редколегії 15.04.2020

## УПРАВЛЕНИЕ СОСТАВОМ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА ВАКУУМНО-ДУГОВЫХ ИСТОЧНИКОВ

Ю.О. Сисоев

Рассмотрены вопросы управления количеством капельной фракции в плазменном потоке технологических вакуумно-дуговых источников плазмы контролируемым изменением температуры рабочей поверхности катода. Такое управление температурой рабочей поверхности катода позволяет получать покрытия в соответствии с функциональными требованиями к ним как с минимальным, так и с максимальным содержанием ка-

пельной фракции. Определено, что параметрами, которые влияют на температуру рабочей поверхности катода, в общем случае являются: плотность теплового потока, поступающего из разряда на рабочую поверхность катода; тепловое сопротивление катода, которое определяется расстоянием между рабочей поверхностью катода и зоной его охлаждения; температура охлаждаемой поверхности катода. Исследованы возможности и особенности регулирования и стабилизации температуры рабочей поверхности катода с охлаждением его как по торцевой, так и по боковой поверхности. В предложенной конструкции источника плазмы с охлаждением катода по торцевой поверхности ограничено регулирования температуры рабочей поверхности катода изменением температуры охлаждаемого торца; более широкое регулирование можно осуществлять током дугового разряда; применение контроля температуры охлаждающей жидкости с одновременным регулированием ее расхода через зону охлаждения позволяет существенно снизить эксплуатационные расходы. Источник плазмы с охлаждением катода по боковой поверхности позволяет изменять температуру рабочей поверхности катода в широком диапазоне путем изменения расстояния между рабочей поверхностью катода и зоной его охлаждения; стабилизация заданной температуры рабочей поверхности катода осуществляется поддержанием установленного расстояния между рабочей поверхностью катода и зоной его охлаждения на постоянном уровне перемещением катода со скоростью, равной скорости испарения материала на рабочей поверхности катода. В этой конструкции возможно изменение температуры рабочей поверхности катода непосредственно в ходе процесса напыления путем изменения расстояния между рабочей поверхностью катода и началом зоны его охлаждения по предварительно заданной программе.

**Ключевые слова:** вакуумная дуга; ионно-плазменные технологии; капельная фаза вакуумно-дугового разряда; температура рабочей поверхности катода; зона охлаждения катода.

## CONTROLLING THE COMPOSITION OF THE PLASMA FLOW OF VACUUM-ARC SOURCES

*Iu. A. Sysoiev*

The problems of managing the amount of drop fraction in the plasma flow of technological plasma vacuum-arc discharge sources by controlling the changing the cathode surface temperature were considered. Such temperature control of the cathode work surface allows obtaining coatings following the functional requirements for them with both minimal and maximum content of drip fraction. It is determined that the parameters that affect the temperature of the working surface of the cathode, in the general case are: the density of heat flux coming from the discharge on the working surface of the cathode; the thermal resistance of the cathode, which is determined by the distance between the working surface of the cathode and its cooling zone; the temperature of the cooling surface of the cathode. The possibilities for regulation and stabilization of cathode surface temperature by cooling the front and the lateral cathode surface were investigated. In the construction of the plasma source with the cooling of the butt-end cathode surface, the restricted cathode surface temperature control is able by changing the temperature of the cooling cathode butt-end. The application of the temperature control of cooling liquid and at the same time control of its flow through the cooling zone could significantly reduce the operating costs. The plasma source with the cathode cooling by lateral surface allows changing the temperature of the cathode working surface over a wide range by varying the distance between the cathode working surface and the cooling area. The stabilization of the set temperature of the cathode surface is maintained by setting the distance between the cathode working surface and the cooling area (by moving the cathode with a speed equal to the speed of cathode material evaporation). The plasma source with the cathode cooling by lateral surface the changing of the cathode working surface temperature is able during the deposition process by changing the distance between the cathode working surface and the cooling area (according to a predetermined program).

**Keywords:** Plasma source; Vacuum arc; Dripping fraction; Cathode working surface temperature.

**Сисоєв Юрій Олександрович** – д-р техн. наук, ст. наук. співр., професор кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Sysoiev Iurii Aleksandrovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor of Dept. of Theoretical Mechanics, Engineering and Robotic Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: i.sysoiev@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0001-5006-8546.