

УДК 621.793.7-027.236

doi: 10.32620/aktt.2022.2.06

Ю. О. СИСОЄВ, Ю. В. ШИРОКИЙ, О. В. ТОРОСЯН

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

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАПАЛЮВАННЯ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО РОЗРЯДУ В ДЖЕРЕЛАХ ПЛАЗМИ

Аналіз створених на даний момент систем запалювання вакуумно-дугового розряду показав наступні напрями підвищення їх ефективності: розробка нових конструктивних рішень як окремих вузлів, так і всієї системи запалювання в цілому; використання композиційних матеріалів для заповнення розрядних проміжків пускових пристроїв; створення нових схемотехнічних рішень джерел живлення пускових розрядів; використання нетрадиційних методів запалювання вакуумно-дугового розряду – переходом тліючого розряду в дуговий; з використанням для запалювання дуги лазерного випромінювання. Запропоновано критерії оцінки надійності та довговічності систем ініціювання вакуумно-дугового розряду в технологічних джерелах плазми, на основі яких виконані комплексні дослідження систем збудження дуги контактного типу з іскровим поверхневим пробоем та двоступінчастих систем запуску з автономним плазмовим інжектором. На основі виконаних досліджень розроблені конструкції вакуумно-дугових джерел плазми з системами контактного типу, що забезпечують їх працездатність у певному діапазоні технологічних параметрів; найбільш ефективною виявилась конструкція системи запалювання, в якій запалювальний електрод і допоміжний анод виконано єдиним конструктивним елементом у формі зрізаної конусоподібної спіралі. Ці конструктивні особливості, по-перше, не перешкоджають конденсації на поверхню пускового розрядного проміжку частини металу, який випаровується катодною плямою (КП) дуги при роботі пристрою, по-друге, істотно полегшують вихід КП від місця ініціювання на робочий торець катода. При цьому магнітне поле, під дією якого відбувається переміщення КП, створюється струмом самого пускового розряду, що тече по виткам конусоподібної спіралі. Ця система запалювання не потребує окремого блока живлення і може працює в автоматичному режимі від джерела живлення дуги. Для здійснення безконтактного методу збудження дуги за допомогою плазмового інжектора досліджені різні їх конструкції, при заповненні їх розрядного проміжку різними матеріалами; виявлено, що ресурс пускових інжекторів при заповненні розрядного проміжку керамікою М-7 не перевищує  $10^4$  спрацьовувань, керамікою 22ХС – на рівні  $10^5$  спрацьовувань, а при застосуванні композиційного матеріалу перевищує  $10^6$  спрацьовувань при енергії підпалювання 5 Дж, частоті робочих імпульсів 1 Гц і тривалості дуги 2 с. Розроблені для заповнення розрядних проміжків пускових інжекторів композиційні матеріали, які відрізняються підвищеною стійкістю до дії електричних розрядів і низькою напругою поверхневого пробоя (до 100...200 В/мм). Такі характеристики забезпечуються особливостями структури КМ, що являє собою діелектричну склоподібну матрицю, заповнену дрібнодисперсними струмопровідними частинками і напівпровідниковими компонентами. Виконано порівняння теоретичних та експериментальних залежностей ймовірності запалювання дуги від енергії підпалювання при роботі інжектора у режимі електричного вибуху плівки, яке показує задовільний збіг результатів.

**Ключові слова:** вакуумна дуга; система запалювання вакуумно-дугового розряду; пусковий інжектор; ресурс і надійність системи збудження; контактні та безконтактні системи ініціювання дуги; композиційні матеріали для систем запалювання дуги.

### Вступ

Для отримання покриттів різного призначення: зносостійких, жароміцних, антифрикційних, корозійностійких, оптичних [1-4], покриттів з гетерними властивостями [5] використовуються плазмові потоки, які генеруються катодною плямою вакуумно-дугового розряду. Галузі застосування таких покриттів дуже різні – це авіаційно-космічна техніка, атомна енергетика, приладобудування та ін. Вакуумно-дугові джерела плазми, будучи одним з основних вузлів

установок іонно-плазмової обробки виробів, багато в чому визначають продуктивність процесів і якість одержуваного поверхневого шару. Надійність і довговічність роботи таких джерел безпосередньо залежить від того, яким чином у кожному конкретному випадку в них вирішено проблему ініціювання (підпалювання) дуги. Нехтування цим питанням на ранньому етапі становлення вакуумно-дугових технологій, на думку І. І. Аксьонова [2], на роки затримало розвиток ряду вакуумно-дугових технологічних процесів і їх автоматизацію.

Метою роботи є дослідження можливості підвищення ефективності запалювання вакуумно-дугового розряду в джерелах плазми. Вирішення цього питання забезпечить більш високі технічні характеристики технологічних джерел плазми, і відповідно, якість одержуваних за їх допомогою покриттів.

## 1. Аналіз стану питання

Збудження вакуумно-дугового розряду в загальному випадку відбувається при створенні між катодом і анодом «плазмового містка». Можливі методи збудження вакуумної дуги були розглянуті І. Г. Кесаєвим. До них належать: розімкнення електричного контакту між катодом і електродом, що підпалює; інжекція плазми від допоміжного плазмового джерела (інжектора); пробій по поверхні ізолятора між катодом і запалювальним електродом (у тому числі вибух тонкоплівкової перемички на цій поверхні); високовольтний пробій у вакуумі; збудження допоміжного газового розряду; створення плазми діями на катод лазерного променя та ін. Особливості ініціювання вакуумної дуги в технологічних джерелах плазми розглянуто в роботі [1, 2, 6].

Основним критерієм надійності системи запалювання (СЗ) джерел плазми є ймовірність збудження  $W$  з її допомогою вакуумно-дугового розряду:

$$W = (n/N)100\% \quad (1)$$

де  $n$  – кількість актів запалювання розряду;  $N$  – загальна кількість актів збудження розряду (кількість імпульсів запалювання, поданих на СЗ джерела плазми).

Під довговічністю СЗ розуміють її ресурс, який визначається загальною кількістю спрацьовувань до її відмови. При цьому відмовою вважається як повний вихід системи з ладу, так і зниження ймовірності збудження з її допомогою вакуумно-дугового розряду нижче певної величини (зазвичай нижче 50 %).

Аналіз створених на даний момент систем запалювання вакуумно-дугового розряду, виконаний у роботі [7] показує наступні напрями підвищення їх ефективності:

- розробка нових конструктивних рішень як окремих вузлів, так і всієї системи запалювання в цілому;
- використання композиційних матеріалів для заповнення розрядних проміжків пускових пристроїв;
- створення нових схемотехнічних рішень джерел живлення пускових розрядів;
- використання нетрадиційних методів запалювання вакуумно-дугового розряду – переходом тліючого розряду в дуговий; з використанням для запалювання дуги лазерного випромінювання.

Внаслідок обмеженості обсягу даної роботи, у ній розглянуті лише два перші напрями.

## 2. Результати досліджень

### 2.1. Конструктивні рішення вузлів систем запалювання

Дотепер тією чи іншою мірою досліджено два основних різновиди систем запалювання – контактні і безконтактні. У контактних початковий згусток плазми створюється розрядом між запалювальним електродом і основним катодом, розділених керамічним або іншим матеріалом. У безконтактних відсутній безпосередній контакт елементів підпалювання з катодом, а пускову плазму генерує автономний плазмовий інжектор. Обидва різновиди таких СЗ можуть працювати як в режимі електричного пробію по поверхні кераміки, так і в режимі електричного вибуху металевої плівки, що осідає на кераміці в процесі роботи джерела плазми.

#### 2.1.1. Контактні системи ініціювання

Застосування іскрового розряду для запалювання дуги низького тиску в технологічних плазмових пристроях має свої особливості, які обумовлені низькою напругою джерел живлення дугового розряду, відносно великими відстанями між основними електродами, а також тим, що збудження дуги здійснюється на холодному катоді. Довговічність запалювального іскрового пристрою при цьому визначається часто не стільки параметрами іскрового розряду, скільки впливом на його елементи прив'язок і плазми основного дугового розряду. У зв'язку з цим при виборі конструкції катодно-пускового вузла необхідно враховувати не тільки умови щодо забезпечення оптимального збудження катодної плями (КП), але й вимоги щодо захисту елементів вузла підпалювання від впливу основного дугового розряду, наприклад шляхом відведення КП від місця її ініціювання на робочу поверхню катода. Простота розглянутого способу запалювання дуги, легкість його реалізації пояснює часті спроби його практичного використання в різних конструктивних виконаннях плазмових пристроїв. У зв'язку з цим експериментальні дані пускових і ресурсних характеристик пристроїв, що реалізують запалювання вакуумно-дугового розряду допоміжним іскровим розрядом, становлять певний практичний інтерес. Конструктивне виконання досліджених в роботі варіантів пускових пристроїв контактної типу наведено на рис. 1. У результаті випробувань доведено, що при досить високій ймовірності запалювання дуги ресурс запалювальних пристроїв, виконаних згідно з рис. 1, а і б, не перевищує декількох тисяч спрацьовувань через інтенсивну ерозію

елементів 3, 4 і 6 вузла підпалювання, в основному внаслідок активного впливу з боку КП основного розряду.

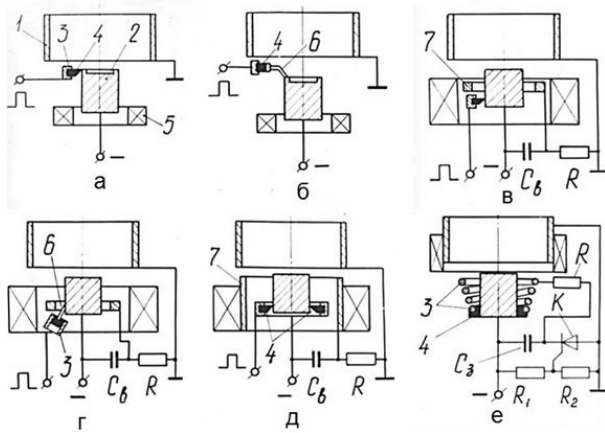


Рис. 1. Іскрові запальвальні пристрої контактного типу: 1 – анод; 2 – катод; 3 – запальвальний електрод; 4 – діелектрична вставка; 5 – соленоїд; 6 – «дзьоб»; 7 – допоміжний анод

У варіантах згідно з рис. 1, в і г елементи пускового пристрою захищені від руйнування дуговим розрядом установленням допоміжного анода 7 і видаленням від робочого торця катода. Ці заходи забезпечують підвищення довговічності вузла підпалювання. Однак при цьому спостерігається зниження надійності запуску. Так, для варіанта за рис. 1, г при тиску у вакуумній камері  $p = 5 \cdot 10^{-2}$  Па, величині стабілізуючого магнітного поля  $H = 1,6 \cdot 10^4$  А/м, створюваного соленоїдом 5, і напрузі підпалювання  $U_n = 350$  В ймовірність запалювання дуги  $W$  у пристрої становить всього 30 %. Демонтаж з пристрою електрода 7 підвищує  $W$  до 40 % при напрузі холостого ходу джерела живлення дугового розряду  $U_{xx} = 65$  В і до 60 % при  $U_{xx} = 130$  В. У запальвальному пристрої (рис. 1, д) змінення геометрії електрода 7 і застосування чотирьох вставок 4 дозволило при достатньому ресурсі забезпечити високу надійність збудження дуги. При цьому експерименти показали значну залежність ймовірності запалювання вакуумно-дугового розряду  $W$  від тиску газу і напруженості магнітного поля, що створюється котушкою 5 (рис. 2). Така залежність, очевидно, є наслідком зростання напруги горіння дуги  $U_d$  зі збільшенням магнітного поля в діапазоні знижених тисків газу. При низькому значенні  $U_{xx}$  (65...130 В) ймовірність згасання дуги у міру збільшення спадання напруги на ній різко зростає, а середньостатистичний час горіння КП зменшується до часток секунди, що і виявляється у вигляді зниження ймовірності запалювання вакуумної дуги. Становить практичний інтерес вакуумно-дуговий пристрій, схему якого подано на

рис. 1, е [8, 9]. У цьому пристрої запальюючий електрод 3 і допоміжний анод 7 виконано єдиним конструктивним елементом у формі зрізаної конусоподібної спіралі.

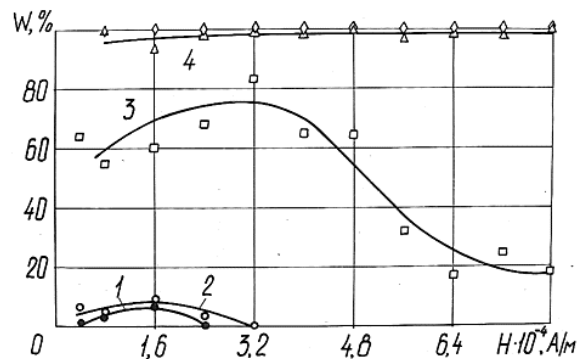


Рис. 2. Вплив магнітного поля на ймовірність запалювання дуги: 1 –  $p = 1,3 \cdot 10^{-3}$  Па; 2 –  $p = 1,3 \cdot 10^{-2}$  Па; 3 –  $p = 1,3 \cdot 10^{-1}$  Па; 4 –  $p = 1,3$  Па

Ці конструктивні особливості, по-перше, не перешкоджають конденсації на поверхню пускового розрядного проміжку частини металу, який випаровується катодною плямою дуги (КП) при роботі пристрою, по-друге, істотно полегшують вихід КП від місця ініціювання на робочий торець катода. При цьому магнітне поле, під дією якого відбувається переміщення КП, створюється струмом самого пускового розряду, що тече по витках конусоподібної спіралі. СЗ такого пристрою не потребує окремого блока живлення і працює в автоматичному режимі від джерела живлення дуги. Такий режим забезпечується відповідним чином підключеними тиристором К, подільником  $R_1$ ,  $R_2$  і запірним конденсатором  $C_3$ . Для надійного збудження дугового розряду в джерелі плазми необхідно, щоб під час його роботи встигала відновлюватися металева плівка на поверхні діелектрика, зруйнована в процесі запалювання. Розширення режимів роботи може бути вирішено зміненням кількості вставок 4.

### 2.1.2. Безконтактні системи ініціювання

Більш досконалим порівняно з розглянутим контактним способом підпалювання дуги є безконтактний метод збудження дуги за допомогою плазмового інжектора. Він характеризується високою швидкістю, компактністю, меншою руйнівною дією на елементи підпалювання вакуумно-дугового розряду, а також більшою технологічністю через відсутність необхідності регулювання положення і закріплення елементів підпалювання кожен раз у міру спрацьовування катода або при його заміні.

Безсумнівною перевагою такої системи запалювання є можливість виготовлення та використання пускового інжектора у вигляді окремої, уніфікованої «свічки» підпалювання. З метою визначення пускових характеристик були досліджені різні конструкції пускових інжекторів, подані на рис. 3, а – е, при заповненні їх розрядного проміжку різними матеріалами.

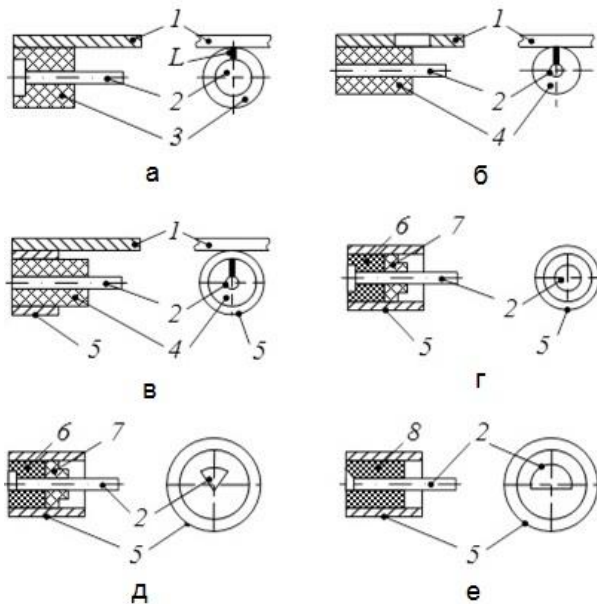


Рис. 3. Варіанти конструкцій пускових інжекторів: 1 – допоміжний анод; 2 – запалювальний електрод; 3 – кераміка 22ХС; 4 – кераміка М-7; 5 – зовнішній електрод пускового інжектора; 6 – електропровідний композиційний матеріал; 7 – керамічне кільце; 8 – композиційний матеріал

Під час випробувань було з'ясовано, що застосування керамік типу 22ХС і М-7 (рис. 3, а – в) для заповнення розрядного проміжку інжекторів, при прийнятній ймовірності збудження дуги, не дозволяє забезпечити ресурс їх роботи більш  $10^5$  спрацьовувань при енергії пускового імпульсу 5 Дж. Пов'язано це з руйнуванням кераміки, цілком ймовірно, під дією термоударів. Дійсно, серед факторів, які супроводжують пусковий електричний розряд, найбільш значущим є імпульсний тепловий вплив пускового розряду, тому що виділення протягом короткого часу (декількох десятків мікросекунд) в невеликій локальній області (характерний розмір порядку 1...2 мм) поблизу поверхні кераміки потужності порядку декількох десятків кіловат призводить до потужного теплового удару по її поверхні. Здатність кераміки протидіяти таким ударам (термостійкість) визначається її фізико-механічними властивостями.

Різні сорти кераміки – окис берилію, 22ХС, міналунд, алунд, стеатит, електрофарфор, були випробувані в роботі [10] для заповнення пускового проміжку в системі запуску імпульсного вакуумно-дугового розряду. Як показали випробування, при використанні берилієвої кераміки запалювальний пристрій має найбільший ресурс – не менше  $10^6$  спрацьовувань при енергії підпалювання 1,8 Дж, частоті робочих імпульсів 0,01...5 Гц і тривалості дуги 2 – 8 мс.

В наших дослідженнях ресурс пускових інжекторів при заповненні розрядного проміжку керамікою М-7 не перевищував  $10^4$  спрацьовувань, керамікою 22ХС був на рівні  $10^5$  спрацьовувань, а при застосуванні композиційного матеріалу перевищував  $10^6$  спрацьовувань при енергії підпалювання 5 Дж, частоті робочих імпульсів 1 Гц і тривалості дуги 2 с.

## 2.2. Композиційні матеріали

На практиці рідко зустрічаються матеріали, що поєднують одночасно весь комплекс необхідних параметрів. У цьому випадку отримати необхідні властивості, зокрема діелектрика, що заповнює розрядний проміжок, можна шляхом створення нових матеріалів складної сполуки, в яких складові матеріали з різними характеристиками забезпечують необхідні властивості композиції. Розроблені для заповнення розрядних проміжків пускових інжекторів композиційні матеріали (КМ) відрізняються підвищеною стійкістю до дії електричних розрядів і низькою напруженою поверхневою пробою (до 100...200 В/мм) [11, 12]. Такі характеристики забезпечуються особливостями структури КМ, що являє собою діелектричну склоподібну матрицю, заповнену дрібнодисперсними струмопровідними частинками і напівпровідниковими компонентами (рис. 4).

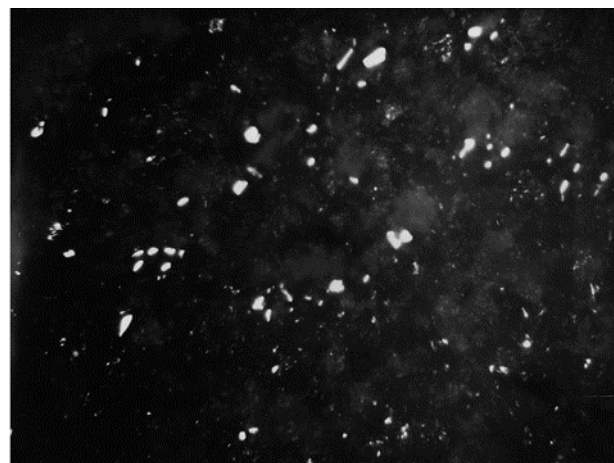


Рис. 4. Морфологія поверхні КМ, виготовленого згідно з роботою [11]. Мікрошліф,  $\times 70$

Підвищення ресурсу пускових інжекторів з КМ пояснюється їх більшою стійкістю до дії електричного розряду. Надійність пускових пристроїв з КМ також підвищується внаслідок можливості їх роботи за відсутності металевої плівки в розрядному проміжку. Найбільш зручними в роботі є пускові інжектори, виконані у вигляді коаксіальних «свічок» підпалювання, розрядний проміжок яких заповнений КМ (рис. 3, г–е). Пускові характеристики штатного джерела плазми установки «Булат-6» при використанні в ньому інжектора з КМ показано на рис. 5 (суцільні криві).

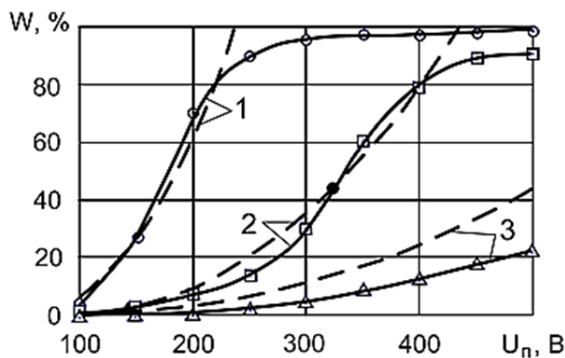


Рис. 5. Ймовірність порушення дуги у джерелі плазми: експеримент – суцільні лінії, розрахунок – пунктирні; 1 –  $C_{п} = 120,0$  мкФ; 2 –  $C_{п} = 40,0$  мкФ; 3 –  $C_{п} = 10,0$  мкФ

Досить значна величина ресурсу пускових інжекторів з КМ (більш  $10^6$  спрацьовувань) пояснюється високою стійкістю матеріалу розрядного проміжку до впливу електричного розряду і термопружного руйнування порівняно з керамікою. При цьому при енергії пускового імпульсу  $\approx 5$  Дж забезпечується ймовірність порушення дуги близько 100%.

Теоретичний розрахунок ймовірності збудження вакуумної дуги в режимах роботи інжектора з пробоем по поверхні КМ і електричним вибухом металевої плівки було виконано в роботі [13]. Порівняння теоретичних та експериментальних графіків залежності ймовірності запалювання дуги від енергії підпалювання при роботі інжектора у режимі електричного вибуху плівки показано на рис. 5. З графіків видно, що модель, покладена в основу розрахунку, адекватно відображає фізичні процеси збудження дуги плазмовим інжектором. Така модель дозволяє априорно оцінювати основні характеристик СП і є рисною при їх конструкторській розробці.

## Висновки

Отримані в даній роботі результати можна узагальнити наступним чином:

- аналіз створених на даний момент систем запалювання вакуумно-дугового розряду показав наступні напрями підвищення їх ефективності: розробка нових конструктивних рішень як окремих вузлів, так і всієї системи запалювання в цілому; використання композиційних матеріалів для заповнення розрядних проміжків пускових пристроїв; створення нових схемотехнічних рішень джерел живлення пускових розрядів; використання нетрадиційних методів запалювання вакуумно-дугового розряду – переходом тліючого розряду в дуговий; з використанням для запалювання дуги лазерного випромінювання.

- запропоновано критерії оцінки надійності та довговічності систем ініціювання вакуумно-дугового розряду в технологічних джерелах плазми, на основі яких виконані комплексні дослідження систем збудження дуги контактного типу з іскровим поверхневим пробоем та двоступінчастих систем запуску з автономним плазмовим інжектором;

- на основі виконаних досліджень розроблені конструкції вакуумно-дугових джерел плазми з системами контактного типу, що забезпечують їх працездатність у певному діапазоні технологічних параметрів; найбільш ефективно виявилась конструкція системи запалювання, в якій запалювальний електрод і допоміжний анод виконано єдиним конструктивним елементом у формі зрізаної конусоподібної спіралі. Ці конструктивні особливості, по-перше, не перешкоджають конденсації на поверхню пускового розрядного проміжку частини металу, який випаровується КП при роботі пристрою, по-друге, істотно полегшують вихід КП від місця ініціювання на робочий торець катода. При цьому магнітне поле, під дією якого відбувається переміщення КП, створюється струмом самого пускового розряду, що тече по виткам конусоподібної спіралі. СЗ такого пристрою не потребує окремого блока живлення і може працювати в автоматичному режимі від джерела живлення дуги;

- для здійснення безконтактного методу збудження дуги за допомогою плазмового інжектора досліджені різні їх конструкції, при заповненні їх розрядного проміжку різними матеріалами; Виявлено, що ресурс пускових інжекторів при заповненні розрядного проміжку керамікою М-7 не перевищує  $10^4$  спрацьовувань, керамікою 22ХС є на рівні  $10^5$  спрацьовувань, а при застосуванні композиційного матеріалу перевищує  $10^6$  спрацьовувань при енергії підпалювання 5 Дж, частоті робочих імпульсів 1 Гц і тривалості дуги 2 с.

- розроблені для заповнення розрядних проміжків пускових інжекторів композиційні матеріали, які відрізняються підвищеною стійкістю до дії електричних розрядів і низькою напругою поверхневого про-

бою (до 100...200 В/мм). Такі характеристики забезпечуються особливостями структури КМ, що являє собою діелектричну склоподібну матрицю, заповнену дрібнодисперсними струмопровідними частинками і напівпровідниковими компонентами.

**Подяки.** Ю. В. Широкий висловлює подяку Національному фонду досліджень України за підтримку (конкурс «Підтримка досліджень провідних та молодих учених», номер проекту 2020.02/0119).

## Література

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

2. Вакуумная дуга: источники плазмы, осаждение покрытий, поверхностное модифицирование [Текст] / 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 нанопокровов на твердом сплаве Т12А [Текст] / 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 [Text] / D. Wainstein, A. Kovalev // Coatings. – 2018. – Vol. 8, No. 223 – 9 p.

5. Kuznezov, V. G. Influence of Thermal Cathode Mode on Properties of Coatings Deposited from Metal Plasma of Vacuum-Arc Discharge [Text] / V. G. Kuznezov, A. A. Lisenkov, V. A. Pavlova // Plasma Devices and Operations. – 2002. – Vol. 10, No. 3. – P. 179–186.

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

7. Сысоев, Ю. О. Технологія машинобудування. Забезпечення ефективності процесів отримання вакуумно-дугових покриттів [Текст] : монографія / Ю. О. Сысоев. – Харків : Нац. аэрокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2021. – 320 с.

8. А. с. 1598836 СССР, МКИ Н 05 В 7/18. Вакуумно-дуговая плазменная установка [Текст] / Ю. А. Сысоев, Г. И. Костюк, А. В. Козаченко (СССР). – 24.05.88.

9. А. с. 1558284 СССР, МКИ Н 05 В 7/22. Вакуумно-дуговое плазменное устройство [Текст] / Ю. А. Сысоев, Г. И. Костюк, И. И. Аксенов (СССР). – 19.04.88.

10. Бендер, Е. Д. Малогабаритный геттерный насос с дуговым испарителем титана [Текст] / Е. Д. Бендер, Г. Ф. Кузнецов, В. Я. Савкин // ПТЭ. – 1987. – С. 144–146.

11. А. с. 1285744 СССР, МКИ С 04 В 35/00. Электропроводящий композиционный материал [Текст] / И. И. Аксенов, В. А. Белоус, С. А. Смирнов, В. Г. Сердюк, Ю. А. Сысоев (СССР). – 10.04.85.

12. А. с. 1353160 СССР, МКИ Н 01 В 1/14. Электропроводящая композиция [Текст] / А. Н. Григорьев, В. В. Марков, В. Г. Сердюк, Ю. А. Сысоев, В. И. Шелохаев (СССР). – 14.04.86.

13. Сысоев, Ю. А. О вероятности зажигания вакуумно-дугового разряда с помощью импульсного инжектора плазмы [Текст] / Ю. А. Сысоев // Вісті Академії інженерних наук України. Спец. вип. «Машинобудування та прогресивні технології». – 2006. – № 3. – С. 236–240.

## 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. azerokosm. un-t «ХАИ». 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, no. 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, no. 3, pp. 179–186.

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

7. Sysoev, Ju. O. *Tehnologija mashynobuduvannja. Zabezpechennja efektyvnosti procesiv otrymannja vakuumno-dugovyh pokryttiv : monografija* [Mechanical engineering technology. Ensuring the efficiency of the processes of obtaining vacuum-arc coatings: a monograph].

Kharkiv, Nac. aerokosm. un-t im. M. Je. Zhukovsk'ogo «Harkiv. aviac. in-t» Publ., 2021. 320 p.

8. Sysoev, Ju. A., Kostjuk, G. I., Kozachenko, A. V. (SSSR). *Vakuumno-dugovaja plazmennaja ustanovka* [Vacuum arc plasma setting]. Pat. USSR, no. 1598836, 1988.

9. Sysoev, Ju. A., Kostjuk, G. I., Aksenov I. I. (SSSR). *Vakuumno-dugovoe plazmennoe ustrojstvo* [Vacuum arc plasma device]. Pat. USSR, no. 1558284, 1988.

10. Bender, E. D., Kuznecov, G. F., Savkin, V. Ja. *Malogabaritnyj getternyj nasos s dugovym isparitelem titana* [Small getter pump with titanium arc evaporator]. *Pribory i tehnika jeksperimenta*, 1987, no. 3, pp. 144–146.

11. Aksenov, I. I., Belous, V. A., Smirnov, S. A., Serdjuk, V. G., Sysoev, Ju. A. (SSSR). *Jelektroprovodjashhij kompozicionnyj material* [Electrically conductive composite material]. Pat. USSR, no. 1285744, 1985.

12. Grigor'ev, A. N., Markov, V. V., Serdjuk, V. G., Sysoev, Ju. A., Shelohaev, V. I. (SSSR). *Jelektroprovodjashhaja kompozicija* [Electrically conductive composition]. Pat. USSR, no. 1353160, 1986.

13. Sysoev, Ju. A. *O verojatnosti zazhiganija vakuumno-dugovogo razrjada s pomoshh'ju impul'snogo inzhektora plazmy* [On the probability of ignition of a vacuum-arc discharge using a pulsed plasma injector]. *Visti Akademii inzhenernih nauk Ukraïni. Spec. vip. «Mashinobuduvannja ta progresivni tehnologii»*, 2006, no. 3, pp. 236–240.

Надійшла до редакції 10.01.2022, розглянута на редколегії 15.04.2022

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЖИГАНИЯ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО РАЗРЯДА В ИСТОЧНИКАХ ПЛАЗМЫ

Ю. А. Сысоев, Ю. В. Широкий, Е. В. Торосян

Анализ созданных на данный момент систем зажигания вакуумно-дугового разряда показал следующие направления повышения их эффективности: разработка новых конструктивных решений как отдельных узлов, так и всей системы зажигания в целом; использование композиционных материалов для заполнения разрядных промежутков пусковых устройств; создание новых схемотехнических решений источников питания пусковых разрядов; использование нетрадиционных методов зажигания вакуумно-дугового разряда – переходом тлеющего разряда в дуговой; с использованием для зажигания дуги лазерного излучения. Предложены критерии оценки надежности и долговечности систем иницирования вакуумно-дугового разряда в технологических источниках плазмы, на основе которых выполнены комплексные исследования систем возбуждения дуги контактного типа с искровым поверхностным пробоем и двухступенчатые системы запуска с автономным плазменным инжектором. На основе выполненных исследований разработаны конструкции вакуумно-дуговых источников плазмы с системами контактного типа, обеспечивающих их работоспособность в определенном диапазоне технологических параметров; наиболее эффективной оказалась конструкция системы зажигания, в которой поджигающий электрод и вспомогательный анод выполнены единым конструктивным элементом в форме срезанной конусообразной спирали. Эти конструктивные особенности, во-первых, не препятствуют конденсации на поверхность пускового разрядного промежутка части металла, испаряемого катодным пятном (КП) дуги при работе устройства, во-вторых, существенно облегчают выход КП от места иницирования на рабочий торец катода. При этом магнитное поле, под действием которого происходит перемещение КП, создается током самого пускового разряда, текущего по виткам конусообразной спирали. Эта система зажигания не требует отдельного блока питания и может работать в автоматическом режиме от источника питания дуги. Для осуществления бесконтактного метода возбуждения дуги с помощью плазменного инжектора исследованы разные его конструкции, при заполнении разрядного промежутка разными материалами; Обнаружено, что ресурс пусковых инжекторов при заполнении разрядного промежутка керамикой М-7 не превышает  $10^4$  срабатываний, керамикой 22ХС – на уровне  $10^5$  срабатываний, а при применении композиционного материала превышает  $10^6$  срабатываний при энергии поджига 5 Дж, частоте рабочих импульсов 1 Гц и длительности дуги 2 с. Разработанные композиционные материалы отличаются повышенной устойчивостью к воздействию электрических разрядов и низким напряжением поверхностного пробоя (до 100...200 В/мм). Такие характеристики обеспечиваются особенностями структуры КМ, представляющей собой диэлектрическую стекловидную матрицу, заполненную мелкодисперсными токопроводящими частицами и полупроводниковыми компонентами. Выполнено сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей вероятности зажигания дуги от энергии поджига при работе инжектора в режиме электрического взрыва пленки, показывающее удовлетворительное совпадение результатов.

**Ключевые слова:** вакуумная дуга; система зажигания вакуумно-дугового разряда; пусковой инжектор; ресурс и надежность системы возбуждения; контактные и бесконтактные системы инициирования дуги; композиционные материалы для систем зажигания дуги.

## INCREASED IGNITION EFFICIENCY VACUUM-ARC DISCHARGE IN PLASMA SOURCES

*Iurii Sysoiev, Yurii Shyrokyi, Elena Torosyan*

The analysis of the existing vacuum-arc discharge ignition systems showed the following ways to improve their efficiency: development of new design solutions for both individual units and the entire ignition system as a whole; the use of composite materials to fill the discharge gaps of starting devices; creation of new circuit solutions for power supplies of starting discharges; the use of non-traditional methods of ignition of a vacuum-arc discharge - the transition of a glow discharge into an arc one; using laser radiation to ignite the arc. Criteria for evaluating the reliability and durability of vacuum-arc discharge initiation systems in technological plasma sources are proposed, based on which complex studies of contact-type arc excitation systems with spark surface breakdown and two-stage launch systems with an autonomous plasma injector. Based on the performed studies, designs of vacuum-arc plasma sources with contact-type systems have been developed that ensure their performance in a certain range of technological parameters; The design of the ignition system turned out to be the most effective, in which the ignition electrode and the auxiliary anode are made as a single structural element in the form of a cut cone-shaped spiral. These design features, firstly, do not prevent the condensation on the surface of the starting discharge gap of a part of the metal evaporated by the cathode spot (CS) of the arc during the operation of the device, and secondly, they greatly facilitate the output of the CS from the place of initiation to the working end of the cathode. Here, the magnetic field, under the action of the CS moves, created by the current of the starting discharge itself, flows along with the turns of the cone-shaped spiral. This ignition system does not require a separate power supply and can operate in an automatic mode from the arc power source. To implement a non-contact method of arc excitation using a plasma injector, various designs of it were studied, when the discharge gap was filled with different materials; it was found that the resource of starting injectors when filling the discharge gap with M-7 ceramics does not exceed  $10^4$  operations, with 22XC ceramics at the level of  $10^5$  operations, and when using a composite material (CM), it exceeds  $10^6$  operations at ignition energy of 5 J, an operating pulse frequency of 1 Hz and arc duration 2 s. The developed composite materials are distinguished by increasing resistance to electric discharges and low surface breakdown voltage (up to 100...200 V/mm). Such characteristics are provided by the features of the CM structure, which is a dielectric glassy matrix filled with finely dispersed conductive particles and semiconductor components. The theoretical and experimental dependence of the arc ignition probability on the ignition energy during the operation of the injector in the electric film explosion mode are compared, showing satisfactory agreement between the results.

**Keywords:** Vacuum arc; Vacuum-arc discharge ignition system; Starting injector; Resource and durability of the ignition system; Contact and non-contact arc initiation systems; Composite materials for arc ignition systems.

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

**Широкий Юрій Вячеславович** – канд. техн. наук, доц. каф. теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Торосян Олена Василівна** – асист. каф. теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем Національного аерокосмічного університету ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Iurii Sysoiev** – Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Theoretical Mechanics, Engineering and Robotic Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: i.sysoiev@khai.edu, ORCID: 0000-0001-5006-8546, Scopus Author ID: 55886163000.

**Yurii Shyrokyi** – Doctor of Philosophy, Assistant-Professor of Department of Theoretical Mechanics, Engineering and Robomechanical Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: i.shyrokyi@khai.edu, ORCID: 0000-0002-4713-0334, Scopus Author ID: 57222322443.

**Elena Torosyan** – Assistant of Dept. of Theoretical Mechanics, Engineering and Robotic Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.tarosyan@khai.edu, ORCID: 0000-0002-7389-6093.