

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ ЗАПАЛЮВАННЯ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО РОЗРЯДУ У ТЕХНОЛОГІЧНИХ ДЖЕРЕЛАХ ПЛАЗМИ

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

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

Запропоновано критерії оцінки надійності та довговічності СЗ 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 СЗ контактного типу, що забезпечують їх працездатність у певному діапазоні технологічних параметрів; найбільш ефективно виявилась конструкція системи СЗ, 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 КМ перевищує 10^6 спрацьовувань при енергії підпалювання 5 Дж, частоті робочих імпульсів 1 Гц і тривалості дуги 2 с.

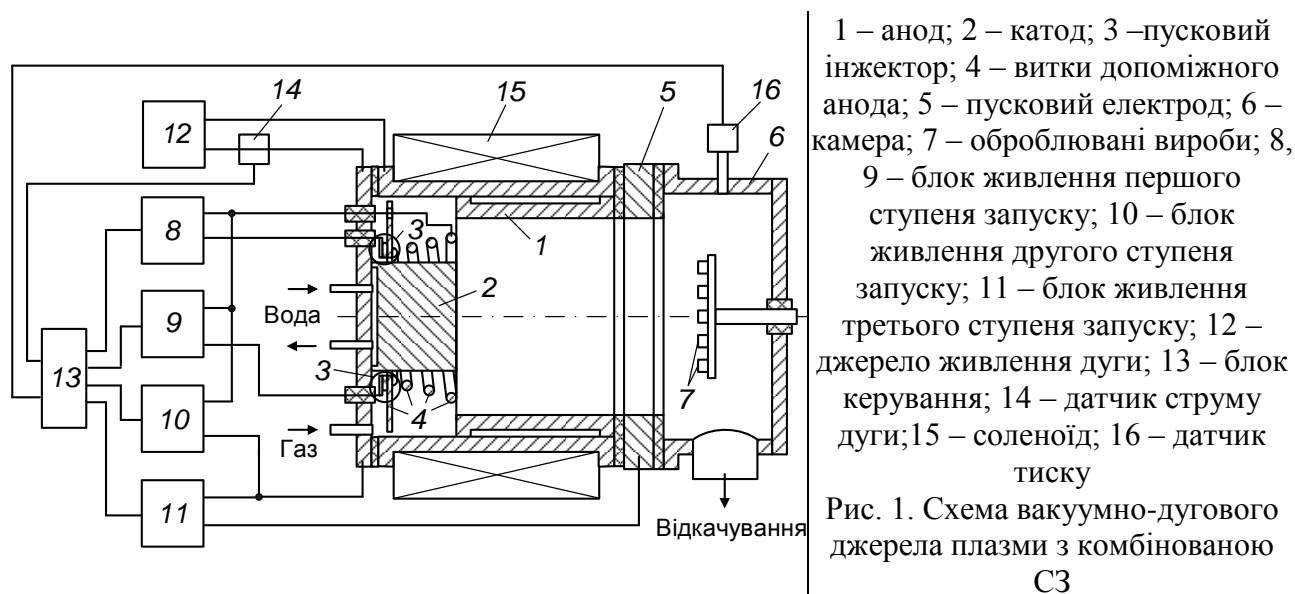
Розроблені для заповнення розрядних проміжків пускових інжекторів КМ, які відрізняються підвищеною стійкістю до дії електричних розрядів і низькою напругою поверхневого пробою (до 100...200 В/мм). Такі характеристики забезпечуються особливостями структури КМ, що являє собою діелектричну склоподібну матрицю, 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.

Дослідження нетрадиційного методу збудження вакуумної дуги за допомогою ПТД здійснювали у експериментальному пристрої, у якому можливо було формувати тліючі розряди різних видів – пеннінговського типу і полокатодний. Результати цих досліджень

показали, що збудження дуги у пристрої найбільш ефективно при низьких тисках реакційних газів, які можуть створювати з'єднання з матеріалом катода на його поверхні.

Для здійснювання іншого нетрадиційного методу – збудження вакуумної дуги ЛВ, потрібно вирішити проблему запилення вікна вводу у вакуумну камеру променя лазера. Існуючі вирішення цієї проблеми полягають у мінімізації потрапляння продуктів ерозії катода на вікно введення лазерного променя, що призводить до значного ускладнення конструкції джерела плазми, тому ця проблема досі остаточно не вирішено.

Досягти максимальної надійності збудження вакуумної дуги можливо у системах збудження комбінованого типу. Розроблено конструкцію джерела плазми з комбінованою системою збудження вакуумної дуги, яку подано на рис. 1.



В конструкції джерела плазми з комбінованою СЗ застосована триступенева система збудження вакуумно-дугового розряду. Як два перших ступені в ній використовується застосовувана в штатних джерелах плазми установок «Булат» безконтактна система запуску, робота третього ступеня запуску основана на переході тліючого розряду в дуговий (ПТД).

Першою сходинкою запуску в джерелі плазми є пусковий інжектор. Оскільки цей вузол є найбільш ненадійне місце СЗ, у джерелі встановлено два перших ступені запуску (два інжектора). Розрядний проміжок інжектора може бути заповнений як керамікою, так і КМ.

При спрацьовуванні одного з інжекторів у розрядному проміжку другого ступеня запуску між першим витком допоміжного анода 4 і катодом 2 ініціюється дуговий розряд з формуванням КП на бічній поверхні катода поблизу першого витка електрода 4. Оскільки живлення на другий ступінь запуску подається через виток найбільшого діаметра, розташований поблизу робочої поверхні катода, то струмом, що проходить по витках спіралі, створюється магнітне поле, яке сприяє виведенню КП на робочу поверхню катода.

Третій ступінь запуску утворено пусковим електродом 5 і різнопотенціальними електродами 1 і 2, що складають полокатодну систему. Живлення ступенів запуску і основного вакуумно-дугового розряду здійснюється від відповідних блоків, підключених згідно зі схемою на рис. 1. Узгоджена робота блоків живлення здійснюється блоком керування 13, який виробляє сигнали вмикання-вимикання блоків живлення ступенів запуску за сигналами, що надходять від датчика струму дуги 14 і датчика тиску 16.

Робота джерела плазми розробленої конструкції має ряд особливостей. При роботі на низьких тисках (менше 10^{-2} Па), наприклад при іонному очищенні, коли ефективність третього ступеня запуску низька, збудження дугового розряду здійснюється першим і другим ступенями запуску. При цьому, оскільки пристрій містить два перших ступені запуску, то

здійснюється почергове спрацьовування кожного за сигналами від блока керування. Відмова одного з них не позначиться на роботі джерела плазми, оскільки буде продовжувати роботу інший. У загальному випадку таке резервування дозволяє в N раз підвищити ресурс роботи першого ступеня, де N – кількість перших ступенів. Одночасно при цьому підвищується надійність спрацьовування перших ступенів, оскільки в N раз буде збільшуватися і час між спрацьовуваннями конкретного першого ступеня, що покращує умови щодо формування провідної плівки в її розрядному проміжку. При цьому для запобігання формуванню дуже товстої плівки в розрядному проміжку першого ступеня (плазмового інжектора), періодично через певний час здійснюється «холосте» спрацьовування одного з перших ступенів запуску.

При переході на режим нанесення покриття тиск у робочому об'ємі підвищується через напуск реакційних газів або їх сумішей. У цьому режимі при згасанні дуги блок 13 за сигналами датчика струму і датчика тиску запускає в роботу блоки живлення третього і другого ступенів запуску. Таким узгодженим режимом роботи забезпечується надійна робота джерела плазми з розробленою СЗ протягом усього циклу нанесення покриття. Його ресурс при цьому значно збільшується, оскільки при іонному очищенні працюють тільки перший і другий ступені запуску, а при нанесенні покриття тільки третій і другий ступені. Така послідовна робота ступенів як мінімум у два рази підвищує ресурс джерела плазми з комбінованою СЗ.

Особливістю запуску джерел плазми з комбінованою СЗ є те, що одночасно з третім ступенем, що працює на основі ПТД, включається і другий ступінь запуску. У цьому випадку наявність витка допоміжного електрода другого ступеня, розташованого поблизу робочої поверхні катода і який знаходиться під позитивним потенціалом щодо катода, сприяє формуванню КП вакуумно-дугового розряду. І чим далі анод джерела плазми розташований від катода, тим ця обставина відіграє важливішу роль.

Має значення і те, що після запуску джерела плазми другий ступінь запуску вимикається. Таким чином забезпечується відсутність струму в ланцюзі допоміжний електрод – катод після запуску джерела, що підвищує коефіцієнт використання матеріалу катода.

Випробування джерела плазми з комбінованою СЗ у режимі нанесення покриттів показали, що надійність запуску пристрою третім ступенем при увімкненому в цей момент другому ступені запуску обумовлена ймовірністю запалювання вакуумно-дугового розряду в діапазоні тисків $10^{-2} \dots 5$ Па, наявністю магнітного поля величиною $10^4 \dots 10^5$ А/м і амплітудою пускових імпульсів 1,5...2,0 кВ близькою до 100 %. При нанесенні покриттів в імпульсних режимах ерозія робочої поверхні катода рівномірна незалежно від режиму.

Список використаних джерел

1. Аксенов, И. И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы / И. И. Аксенов. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2005. – 212 с.
2. Андреев, А. О. Технология машиностроения. Основы получения вакуумно-дуговых покрытий : учебник / А. О. Андреев, В. М. Павленко, Ю. О. Сисоев. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т им. М. С. Жуковского «Харків. авіац. ін-т», 2018. – 288 с.
3. Сисоев, Ю. О. Технология машиностроения. Обеспечение эффективности процессов получения вакуумно-дуговых покрытий : монография / Ю. О. Сисоев. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т им. М. С. Жуковского «Харків. авіац. ін-т», 2021. – 320 с.
4. Сысоев, Ю. А. Иницирование вакуумно-дугового разряда в технологических источниках плазмы / Ю. А. Сысоев // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Харьков, 2010. – Вып. 3 (63). – С. 280–295.