

УДК 621.793.7-028.76

doi: 10.32620/aktt.2022.4.04

Ю. О. СИСОЄВ, Ю. В. ШИРОКИЙ, А. Ю. СИСОЄВ

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

ЗАПАЛЮВАННЯ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО РОЗРЯДУ В ДЖЕРЕЛАХ ПЛАЗМИ НЕТРАДИЦІЙНИМИ МЕТОДАМИ

Предметом вивчення в статті є процеси збудження вакуумно-дугового розряду у джерелах плазми нетрадиційними методами: переходом тліючого розряду в дуговий (ПТД) та ініціювання дуги за допомогою лазерного випромінювання (ЛВ). **Метою** роботи є підвищення ресурсу систем запалювання (СЗ) джерел плазми для розширення їх технологічних можливостей і якості одержуваних покриттів. **Завдання:** дослідити режими, за яких нетрадиційні СЗ стабільно збуджують дуговий розряд і при цьому забезпечується їх високий ресурс роботи. Використовуваними **методами** є аналітичні, та методи експериментальних досліджень, які здійснювались за допомогою розроблених нових пристроїв. Отримані такі **результати**. Дослідження збудження дуги за допомогою ПТД у системі електродів пеннінгівського типу показало, що використання джерела плазми з такою СЗ є доцільним у процесах, в яких застосовують реакційні гази, що утворюють на поверхні катода сполуки з його матеріалом. В іншому випадку через кілька сотень спрацьовувань ймовірність ПТД знижується до значень 10...50 %, що пояснюється очищенням поверхні катода від різних неоднорідностей. Запалювання дуги ПТД із застосуванням діелектричних стимуляторів катодної плями (КП) розширяє технологічні можливості джерела плазми. Дуговий розряд у цьому випадку стабільно запалюється в діапазоні тисків від 10^{-2} до 10 Па, імпульсами напруги порядку 2 кВ при магнітному полі напруженістю $5,6 \cdot 10^4$ А/м і енергії пускового імпульсу 2 Дж. Розроблено конструкцію джерела плазми з комбінованою СЗ дуги, яка дозволяє досягти максимальної надійності збудження вакуумної дуги. Джерело плазми з комбінованою СЗ має надійність запуску пристрою в діапазоні тисків $10^{-2} \dots 5$ Па, наявності магнітного поля величиною $10^4 \dots 10^5$ А/м і амплітудою пускових імпульсів 1,5...2,0 кВ близьку до 100 %. Розглянуто умови, за яких формування конденсату парів матеріалу катода джерела плазми на поверхні вікна введення ЛВ не відбувається і запропоновано для вирішення цієї проблеми подання енергії у зону конденсації безпосередньо в шар конденсату, що формується. **Висновки.** Обґрунтовано і досліджено використання нетрадиційних методів збудження вакуумно-дугового розряду: за допомогою ПТД та ЛВ, розроблена комбінована СЗ, в якій спільно застосовуються традиційні та нетрадиційні методи запалювання дуги з використанням переваг кожного метода ініціювання, знайдено параметри, при яких досліджені СЗ працюють надійно і мають високий ресурс.

Ключові слова: вакуумна дуга; система запалювання вакуумно-дугового розряду; системи збудження на основі переходу тліючого розряду у дуговий; збудження дуги лазерним випромінюванням.

Вступ

Плазмові потоки, які генеруються КП вакуумно-дугового розряду, знайшли широке практичне застосування для отримання вакуумно-дугових покриттів різного призначення, яким властиві високі експлуатаційні характеристики [1, 2]. Галузі застосування таких покриттів дуже різні – це авіаційно-космічна техніка, машинобудування, атомна енергетика та ін.

Надійна робота джерел плазми, що створюють плазмові потоки, багато в чому визначається їх системами запалювання (СЗ). Раніше у роботі [3] досліджувалося питання підвищення ефективності СЗ вакуумно-дугового розряду у джерелах плазми. В основному при цьому розглядався традиційний метод збудження вакуумної дуги за допомогою плазмового

інжектора, а підвищення ефективності забезпечувалося конструктивними рішеннями та застосуванням у пусковому розрядному проміжку інжектора спеціально розроблених композиційних матеріалів [4–6].

Результати проведених досліджень показали, що ресурс таких систем запалювання при надійності збудження дуги близькою до 100% не перевищує 10^6 спрацьовувань. Цього ресурсу цілком достатньо для роботи джерел плазми в стаціонарному та квазістаціонарному режимах, проте робота в імпульсному режимі вимагає підвищення ресурсу СЗ як мінімум, на один, два порядки.

Для вирішення цього завдання є перспективним використання нетрадиційних методів збудження вакуумно-дугового розряду: переходом тліючого розряду в дуговий та ініціювання дуги за допомогою випромінювання лазера. Говорячи про нетрадиційність

розглянутих нижче способів збудження вакуумної дуги, мається на увазі, що хоча вони досить відомі [7–9], але з певних причин дотепер не знайшли широкого практичного застосування в конструкціях вакуумно-дугових джерел плазми.

Перспективним представляється також розроблення комбінованих СЗ, в яких можливо спільне застосування традиційних та нетрадиційних методів запалювання дуги з використанням переваг кожного метода ініціювання.

Метою роботи є підвищення ресурсу і надійності СЗ вакуумно-дугових джерел плазми. Для досягнення мети в роботі виконані дослідження СЗ вакуумно-дугового розряду нетрадиційними методами, в тому числі за допомогою розробленої комбінованої СЗ з використанням переваг кожного метода ініціювання. Вирішення цього питання розширить технологічні можливості вакуумно-дугових джерел плазми і відповідно, якість одержуваних за їх допомогою покриттів.

1. Аналіз стану питання

Перехід тліючого розряду за певних умов у дуговий – явище, яке досить поширене в окремих галузях техніки. Іноді воно небажане, в інших випадках забезпечує працездатність пристроїв.

У технологічних плазмових процесах зі створенням плазми тліючим розрядом виникає проблема несанкціонованого його переходу в дуговий розряд. Таке мимовільне дугоутворення спостерігається при азотуванні в стаціонарному тліючому розряді [10], при іонному очищенні перед нанесенням вакуумно-дугових покриттів [11]. Близькі проблеми, пов'язані з виникненням «уніполярних дуг» і, як результат, з подальшим забрудненням та охолодженням плазми, мають місце в дослідженнях з керованого термоядерного синтезу [12].

З іншого боку робота цілого класу пристроїв, що забезпечують комутацію великих імпульсних струмів (керовані вакуумні та газонаповнені розрядники) [13] заснована на ініціюванні вакуумної дуги, у тому числі і за допомогою ПТД.

На відміну від вакуумних керованих розрядників проблему запалювання розряду у вакуумно-дугових джерелах плазми доводиться вирішувати в умовах низьких напруг (зазвичай до 100 В) при струмах порядку сотень ампер як у імпульсному, так і у стаціонарному режимах. Інтерес до запуску технологічних джерел плазми шляхом переходу різних різновидів тліючого розряду в вакуумно-дуговий викликається тим, що в цьому випадку пускова плазма може створюватися системою електродів досить великих розмірів. При цьому виготовлення їх масивними і водоохолоджуваними має різко підвищити стійкість

пускової електродної системи до руйнівної дії дугового розряду, що особливо необхідно в імпульсному режимі роботи. Крім того, оскільки КП дугового розряду, що ініціюється тліючим розрядом, у певних умовах з однаковою ймовірністю виникає в будь-якій точці робочої поверхні катода, то ерозія останнього навіть в імпульсному режимі буде досить рівномірною, тому знімаються обмеження за розмірами катода, що приводить до підвищення ресурсу джерела плазми. Розроблених конструкцій діючих вакуумно-дугових джерел плазми, що працюють на основі ПТД, на початок наших досліджень, як показав огляд літератури, не існувало, що послужило обґрунтуванням для виконання даної роботи.

Інший нетрадиційний метод запалювання вакуумної дуги – променем лазера, дедалі все більше використовується для запалення вакуумної дуги. Створення в міжелектродному проміжку плазми за допомогою променя лазера, спрямованого на один з електродів або безпосередньо в газовому проміжку, широко застосовується для запалювання дуги в різних типах розрядників. Перевагами такого запуску є висока точність вмикання розрядника і гальванічна розв'язка ланцюгів запалювання і основного розряду [14]. У джерелах плазми на основі стаціонарного дугового розряду цей метод поки що не отримав практичного застосування, оскільки зазначені переваги в цьому випадку не є визначальними і до того ж виникає проблема запилення вікна введення лазерного випромінювання у вакуумну камеру.

Для імпульсних джерел плазми досить перспективним є застосування променя лазера для підпалювання вакуумної дуги. У цьому випадку можна забезпечити високий ресурс СЗ при стабільному збудженні дуги. В одному з перших оглядів з формування металеві плазми [15] цей метод згадується, але не розглядається, в основному через високу в той час вартість лазерних систем і досить великих їх габаритів. Зараз лазерні системи стали більш доступними, що збільшило й інтерес до них.

Проблема із запиленням продуктами ерозії катода вікна введення променя лазера у вакуумну камеру вирішується в сучасних джерелах плазми в основному способом мінімізації кількості продуктів ерозії (насамперед пари матеріалу) катода, які потрапляють на вікно введення променя лазера. Прикладами реалізації цього способу є роботи [16, 17], у яких вікно введення закрито заслінкою, що відкривається тільки на короткий час під час проходження випромінювання.

Кардинально ця проблема вирішується завдяки повному закриттю шляху потоку пари матеріалу катода до вікна введення. Прикладом цього вирішення є імпульсне джерело плазми [18], у якому приблизно через дві секунди (1000 імпульсів) роботи джерела з

графітовим катодом через осадження вуглецевої плівки прозорість вікна зменшується на 60 %. З метою захисту вікна введення ЛВ від запилення перед ним встановлюється стрічка з прозорого полімерного матеріалу, яка під час роботи джерела рухається перед вікном, безперервно оновлюючи прозорість каналу введення випромінювання.

Слід зазначити, що в обох розглянутих випадках відбувається суттєве ускладнення конструкції джерела плазми, яке підвищує його вартість та істотно знижує надійність.

2. Результати досліджень

Дослідження щодо збудження вакуумно-дугового розряду шляхом переходу тліючого розряду в дуговий виконувалися в таких напрямках: ПТД у системі електродів пеннінговського типу [19] і ПТД з використанням полого катода із застосуванням діелектричних стимуляторів КП [20].

2.1. Збудження вакуумної дуги у системі електродів пеннінговського типу

ПТД у системі електродів пеннінговського типу досліджували в експериментальному пристрої, наведеному на рис. 1.

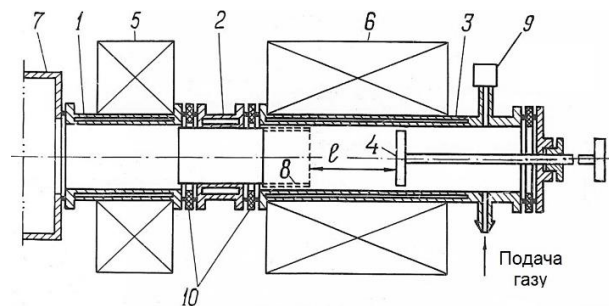


Рис. 1. Експериментальний вакуумно-дуговий пристрій: 1, 2, 3 – трубочасті водоохолоджувані електроди; 4 – перемішуваний електрод (катод);

5, 6 – соленоїди; 7 – вакуумна камера; 8 – змінна вставка; 9 – датчик тиску; 10 – ізолятори

Схеми підключення пристрою до джерела живлення розряду 7 і до генератора пускових імпульсів (утворених елементами C_n , K і випрямлячем 8) показано на рис. 2.

Під час експериментів, виконувався пошук умов, за яких ПТД відбувався у найбільш широкому діапазоні тисків з виникненням КП на електроді 4. Для схеми включення електродів (рис. 2, б) показано ПТД при різній напрузі U_0 залежно від тиску азоту (рис. 3). Особливості ПТД відображає рис. 4.

Проведені дослідження дозволили встановити закономірності ПТД залежно від різних умов – величини напруги, що подається, напруженості і конфігурації магнітних полів, тиску газу, положенні електрода 4. Вони стали основою для створення дослідного імпульсного джерела плазми, показаного на рис. 5, а, в якому можна створювати тліючі розряди різних типів. Пускові характеристики такого джерела при використанні полокатодного тліючого розряду наведено на рис. 5, б.

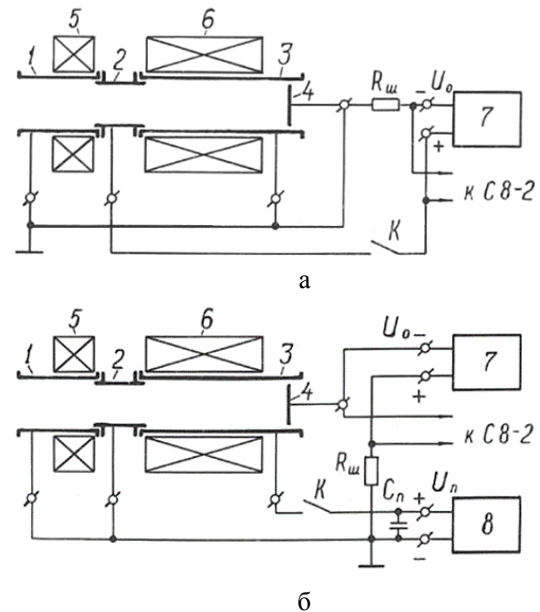


Рис. 2. Схеми підключення експериментального пристрою: 7 – джерело живлення дугового розряду;

8 – високовольтний випрямляч (інші позиції, як на рис. 1); а – без пускової ємності;

б – з пусковою ємністю

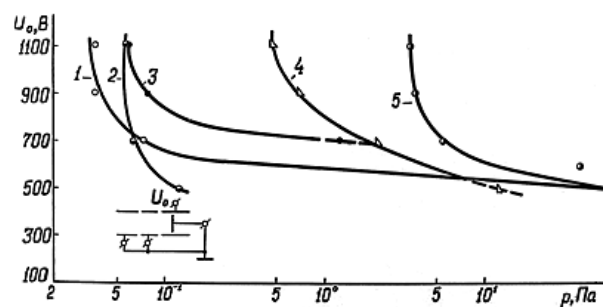


Рис. 3. Графіки залежності ПТД від тиску азоту:

2 – узгоджене з'єднання; 4 – зустрічне з'єднання

котушок; 1 – $H_1 = 8 \cdot 10^4$ А/м, $H_2 = 0$;

2 – $H_1 = 2 \cdot 10^5$ А/м, $H_2 = 4 \cdot 10^4$ А/м;

3 – $H_1 = 0$, $H_2 = 4 \cdot 10^4$ А/м;

4 – $H_1 = 2 \cdot 10^5$ А/м, $H_2 = 4 \cdot 10^4$ А/м;

5 – $H_1 = H_2 = 0$;

1 – 4 – ПТД між електродами 3 і 4;

5 – ПТД між електродами 3 і 2

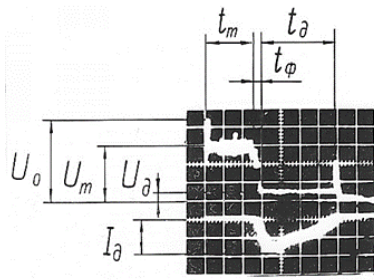


Рис. 4. Характерна осцилограма ПТД

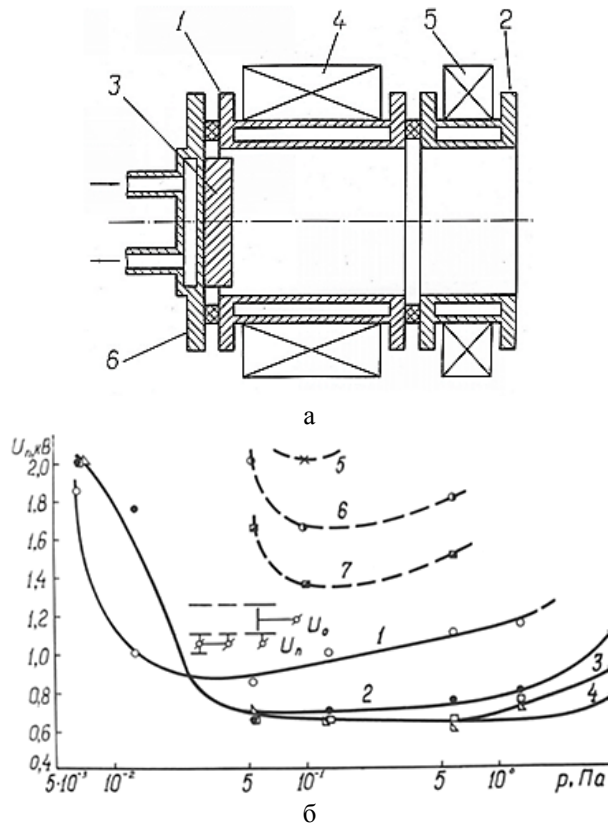


Рис. 5. Конструкція (а) і пускові характеристики (б) імпульсного джерела плазми:

а: 1, 2 – трубчасті електроди; 3 – катод;
4, 5 – котушки; 6 – опорний фланець; б: $U_0 = 120$ В;
 $N_2 = 6 \cdot 10^4$ А/м; 2 – 4 – узгоджене з'єднання,
5 – 7 – зустрічне з'єднання соленоїдів;
величина N_1 : 1 – 0; 2, 5 – $4 \cdot 10^4$ А/м;
3, 6 – $9,6 \cdot 10^4$ А/м; 4, 7 – $2,4 \cdot 10^5$ А/м

Використання такого джерела плазми є доцільним у технологічних процесах, в яких застосовують реакційні гази, які утворюють на поверхні катода сполуки з його матеріалом. Створювані плівки є активними центрами, де відбувається формування КП. В іншому випадку через кілька сотень спрацьовувань ймовірність ПТД знижується до значень 10...50 %, що пояснюється очищенням поверхні катода від різних неоднорідностей та забруднень.

2.2. Збудження вакуумної дуги ПТД з використанням полого катода із застосуванням діелектричних стимуляторів КП

Розширити технологічні можливості вдалося в джерелі плазми, де ПТД здійснюється в полокатодній системі з використанням діелектричних стимуляторів КП [20, 21]. Експериментальний зразок джерела плазми, в якому збудження дуги проводиться ПТД з діелектричними стимуляторами КП показано на рис. 6, а, його пускові характеристики наведено на рис. 6, б.

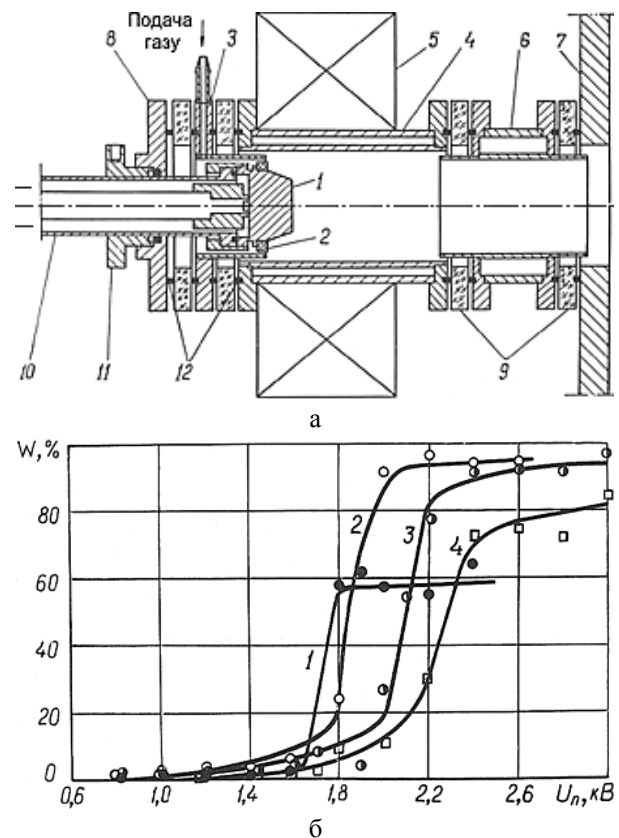


Рис. 6. Експериментальний пристрій з діелектричним стимулятором КП (а) і його пускові характеристики (б): а: 1 – катод; 2 – діелектричний стимулятор КП; 3 – екран з каналом подачі газу; 4 – анод; 5 – соленоїд; 6 – пусковий електрод; 7 – вакуумна камера; 8 – тримач катода; 9 – оргскло; 10 – вивід катода; 11 – гайка; 12 – ущільнювачі; б: – $p = 5,3 \cdot 10^{-2}$ Па (N_2); $N = 5,6 \cdot 10^4$ А/м; величина C_n : 1 – 10 мкФ; 2 – 2 мкФ; 3 – 1 мкФ; 4 – 0,25 мкФ

Результати досліджень джерела плазми із запалюванням дуги ПТД із застосуванням діелектричних стимуляторів КП показують, що дуговий розряд у ньому досить стабільно запалюється в широкому діапазоні тисків (приблизно від 10^{-2} до 10 Па) імпульсами напруги порядку 2 кВ в присутності магнітного поля, напруженість якого становить $5,6 \cdot 10^4$ А/м при

енергії пускового імпульсу близько 2 Дж. Наявність діелектричних стимуляторів КП забезпечує працездатність пристрою у середовищі як реакційних, так і інертних газів.

2.3. Система збудження вакуумної дуги комбінованого типу

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. 7 [22, 23].

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.

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 композиційним матеріалом.

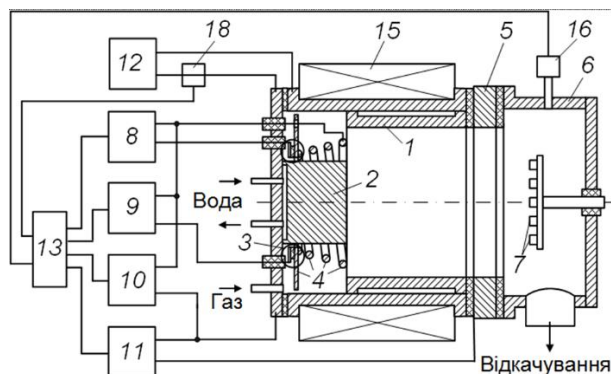


Рис. 7. Схема вакуумно-дугового джерела плазми з комбінованою СЗ: 1 – анод; 2 – катод; 3 – пусковий інжектор; 4 – витки допоміжного анода; 5 – пусковий електрод; 6 – камера; 7 – оброблювані вироби; 8, 9 – блок живлення першого ступеня запуску; 10 – блок живлення другого ступеня запуску; 11 – блок живлення третього ступеня запуску; 12 – джерело живлення дуги; 13 – блок керування; 14 – датчик струму дуги; 15 – соленоїд; 16 – датчик тиску

При спрацюванні 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. 7. 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 по черговому спрацювання 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 спрацювання перших ступенів, оскільки в N раз буде збільшуватися і час між спрацюваннями 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» спрацювання 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 згаданні 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.

2.3. Вирішення проблеми запилення вікна введення лазерного випромінювання

Запропоновані в роботах [16–18] рішення по захисту вікна введення ЛВ від запилення не є досконалими, тому що вони суттєво ускладнюють конструкцію СЗ і самого джерела плазми, що підвищує його вартість та істотно знижує надійність. Крім того, рішення по мінімізації запилення вікна введення [16] все одно вимагають періодичного очищення вікна введення ЛВ або його заміни.

Відомо що конденсація пари металів не відбувається ні на яких мішенях, якщо їх температура не нижче деякої критичної температури, що залежить від щільності потоку пари [24]. Слід додати, що ця температура буде визначатися також матеріалом, який надходить до підкладки, а також рядом інших обставин. У самому першому наближенні її можна прийняти не менше температури плавлення матеріалу катода, пари якого надходять на підкладку, якою в нашому випадку є вікно введення ЛВ.

Вікно введення ЛВ зазвичай виготовляють з різних видів скла, найбільш термостійким з яких є кварцове скло, що витримує температуру 1100 °С (короткочасно до 1400...1500 °С). З іншого боку температура плавлення одного з найчастіше застосовуваних матеріалів катода джерела плазми – титану є

1671 °С [25]. Звідси можна зробити висновок, що підтримувати температуру вікна введення ЛВ на рівні, при якому на ньому не відбувається конденсація є неможливим.

Виходом з такого положення, на наш погляд, може бути один із способів введення енергії у зону конденсації: або в дуже тонкий поверхневий шар вікна введення ЛВ, на який надходять молекули матеріалу катода, або безпосередньо в шар конденсату, що формується. Ця енергія може вводитися відомими способами – НВЧ випромінюванням, електронним променем, випромінюванням лазера.

Перший спосіб введення енергії може призвести до розтріскування поверхневого шару скла, тому його застосування є проблематичним. Другий спосіб введення енергії є більш перспективним. Однак його реалізація вимагає подальших досліджень, оскільки необхідно враховувати особливості формування тонких плівок [26], а також ряд інших обставин: матеріал катода джерела плазми, струм вакуумно-дугового розряду, потужність енергії, що вводиться, метод введення (у тому числі імпульсний або стаціонарний) та інші.

Висновки

Отримані в даній роботі результати можна узагальнити наступним чином:

- обґрунтовано використання нетрадиційних методів збудження вакуумно-дугового розряду: переходом тліючого розряду в дуговий та ініціювання дуги за допомогою випромінювання лазера, а також розроблення комбінованих СЗ, в яких можливо спільне застосування традиційних та нетрадиційних методів запалювання дуги з використанням переваг кожного метода ініціювання;

- дослідження збудження вакуумної дуги у системі електродів пеннінговського типу показало, що використання джерела плазми з такою СЗ є доцільним у технологічних процесах, в яких застосовують реакційні гази, які утворюють на поверхні катода сполуки з його матеріалом. В іншому випадку через кілька сотень спрацьовувань ймовірність ПТД знижується до значень 10...50 %, що пояснюється очищенням поверхні катода від різних неоднорідностей;

- запалювання дуги ПТД із застосуванням діелектричних стимуляторів КП розширяє технологічні можливості джерела плазми. Дуговий розряд у цьому випадку досить стабільно запалюється в широкому діапазоні тисків (від 10^{-2} до 10 Па) імпульсами напруги порядку 2 кВ в присутності магнітного поля, напруженість якого становить $5,6 \cdot 10^4$ А/м при енергії пускового імпульсу близько 2 Дж. Наявність діелектричних стимуляторів КП забезпечує працездатність СЗ у середовищі як реакційних, так і інертних газів.

– розроблено конструкцію джерела плазми з комбінованою СЗ вакуумної дуги, яка дозволяє досягти максимальної надійності збудження дуги. Випробування джерела плазми з комбінованою СЗ 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 показало, що ймовірність запалювання вакуумно-дугового розряду близька до 100 %. При нанесенні покриттів в імпульсних режимах ерозія робочої поверхні катода рівномірна незалежно від режиму;

– розглянуто умови, за яких формування конденсату парів матеріалу катода джерела плазми на поверхні вікна введення ЛВ не відбувається і запропоновано для вирішення цієї проблеми подання енергії у зону конденсації безпосередньо в шар конденсату, що формується. Ця енергія може вводиться відомими способами – НВЧ випромінюванням, електронним променем, випромінюванням лазера.

Подяки. Автор **Ю. В. Широкий** висловлює подяку Національному фонду досліджень України за підтримку проєкту № 2020.02/0119 (конкурс «Підтримка досліджень провідних та молодих учених»).

Література

1. Tribological Behaviors of Super-Hard TiAlN Coatings Deposited by Filtered Cathode Vacuum Arc Deposition [Text] / Z. Zhang, L. Zhang, H. Yuan, M. Qiu, X. Zhang, B. Liao, F. Zhang, X. Ouyang // Materials. – 2022. – Vol. 15, Iss. 6. – Article No. 2236. DOI: 10.3390/ma15062236.
2. Microstructure, adhesion, mechanical and corrosion properties of TiN coatings deposited by high energy pulse-enhanced vacuum arc evaporation [Text] / Y. Ma, J. Yang, X. Tian, C. Gong, W. Zheng, Y. He, Z. Gao // Journal of Adhesion Science and Technology. – 2020. – Vol. 34, Iss. 10. – P. 1040-1061. DOI: 10.1080/01694243.2019.1690774.
3. Сисоєв, Ю. О. Підвищення ефективності запалювання вакуумно-дугового розряду в джерелах плазми [Текст] / Ю. О. Сисоєв, Ю. В. Широкий, Е. В. Торосян // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2022. – № 2(178). – С. 47–54. DOI: 10.32620/akt.2022.2.06.
4. Сисоєв, Ю. О. Технологія машинобудування. Забезпечення ефективності процесів отримання вакуумно-дугових покриттів [Текст] : монографія / Ю. О. Сисоєв. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. С. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2021. – 320 с.
5. А. с. 1285744 СССР, МКИ C04 B35/00. Электропроводящий композиционный материал [Текст] / И. И. Аксенов, В. А. Белоус, С. А. Смирнов, В. Г. Сердюк, Ю. А. Сысоев (СССР). – 10.04.85
6. А. с. 1353160 СССР, МКИ H01 B1/14. Электропроводящая композиция [Текст] / А. Н. Григорьев, В. В. Марков, В. Г. Сердюк, Ю. А. Сысоев, В. И. Шелохаев (СССР). – 14.04.86.
7. 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.
8. Anders, A. Cathodic Arcs – From Fractal Spots to Energetic Condensation [Text] / A. Anders. – Springer, 2008. – 540 p.
9. Boxman, R. L. Handbook of Vacuum Arc Science and Technology [Text] / R. L. Boxman, D. M. Sanders, Ph. J. Martin (Eds.). – Noyes Publications, Park Ridge, NJ, USA, 1995. – 742 p.
10. Белевский, В. П. Импульсная ионная обработка и осаждение тонких пленок и покрытий [Текст] / В. П. Белевский, А. И. Кузьмичев, Э. Ф. Масалитин. – Киев : Общество «Знание» Украины, 1991. – 22 с.
11. Андреев, А. А. Вакуумно-дуговые покрытия [Текст] / А. А. Андреев, Л. П. Саблев, С. Н. Григорьев. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2010. – 317 с.
12. Недоспасов, А. В. Физика пристеночной плазмы в токамаках [Текст] / А. В. Недоспасов // Успехи физ. наук. – 1987. – Т. 152, вып. 3. – С. 479-492.
13. Фаррел, Дж. Инициация вакуумной дуги [Текст] / Дж. Фаррел // В кн. Вакуумные дуги ; ред. Дж. Лафферти. – М. : Мир, 1982. – С. 108-152.
14. Баранов, М. И. Применение новых газоразрядных и твердотельных полупроводниковых коммутаторов в силовых цепях мощных высоковольтных электрофизических установок [Текст] / М. И. Баранов // Электротехника і електромеханіка. – 2009. – № 1. – С. 55–58.
15. Аксенов, И. И. Формирование потоков металлической плазмы : обзор [Текст] / И. И. Аксенов, В. Г. Падалка, В. М. Хороших. – М. : ЦНИИатоминформ, 1984. – 83 с.
16. Сысоев, Ю. А. Автоматизированная система измерения температуры для вакуумных многоцелевых технологических установок [Текст] / Ю. А. Сысоев // Новые технологии в машиностроении : тр. V Междунар. конф. – Рыбачье, 3-8 сент. 1996. – Харьков : ХАИ, 1996. – С. 285–287.
17. Пат. РФ № 2176681, МПК C23C14/00. Способ получения покрытий в вакууме, устройство для получения покрытий в вакууме, способ изготовления устройства для получения покрытий в вакууме [Текст] / В. В. Волков, С. И. Мирошкин, С. В. Шалимов, А. А. Савельев. – Опубл. 10.12.2001.

18. Scheibe, H.-J. Preparation of diamond-like films by laser-controlled arc deposition (LASER – ARC) [Text] / H.-J. Scheibe, D. Dreschner // *Thin Films Proc. of the joint 4th Int. Symp. TATF'94 and the 11th Conf. HVITF'94, Dresden, march 7–11, 1994.* – P. 139-142.

19. Аксенов, И. И. Применение пеннинговского разряда для зажигания дуги в технологических источниках плазмы [Текст] / И. И. Аксенов, Ю. А. Сысоев // *Ионно-плазменные установки для технологических целей : сб. науч. тр. – Харьков : ХАИ, 1988.* – С. 16–21.

20. Сысоев, Ю. А. Применение диэлектрических стимуляторов катодного пятна для возбуждения дуги тлеющим разрядом в технологических источниках плазмы [Текст] / Ю. А. Сысоев // *Ионно-плазменные установки для технологических целей : сб. науч. тр. – Харьков : ХАИ, 1988.* – С. 22–27.

21. А. с. 1235449 СССР, МКИ H05 B7/22. Вакуумно-дуговое плазменное устройство для нанесения покрытий [Текст] / И. И. Аксенов, Ю. А. Сысоев, В. М. Хороших (СССР). – 01.02.86.

22. Сысоев, Ю. А. Технологический источник плазмы с комбинированной системой возбуждения вакуумно-дугового разряда [Текст] / Ю. А. Сысоев // *Вопросы атомной науки и техники.* – 2013. – № 5(87). – С. 154–157.

23. Пат. України № 107598, МПК H05H 1/26, H05H 1/34, H05B 7/22 (2006). Вакуумно-дуговий пристрій для нанесення покриттів [Текст] / Ю. О. Сысоев, Г. І. Костюк ; Заявник та патентовласник Нац. аерокосм. ун-т «Харків. авіац. ін-т» ; заявл. 14.01.2013 ; опубл. 26.01.2015, Бюл. № 2, 2015. – 11 с.

24. Rideal, Eric K. Concepts in Catalysis [Text] / Eric K. Rideal. – Academic Press, 1968. – 194 p.

25. Химическая энциклопедия. В 5 т. [Текст] / Гл. ред. Н. С. Зефирова. – М. : Большая российская энциклопедия, 1995. – Т. 4 : Пол-Три. – 639 с.

26. Быков, Ю. А. О некоторых особенностях структуры и свойств металлических "тонких" плёнок [Текст] / Ю. А. Быков, С. Д. Карпунин, Е. И. Газукина // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2000. – № 6. – С. 45-47.

References

1. Zhang, Z., Zhang, L., Yuan, H., Qiu, M., Zhang, X., Liao, B., Zhang, F., Ouyang, X. Tribological Behaviors of Super-Hard TiAlN Coatings Deposited by Filtered Cathode Vacuum Arc Deposition. *Materials*, 2022, vol. 15, iss. 6, article no. 2236. DOI: 10.3390/ma15062236.

2. Ma, Y., Yang, J., Tian, X., Gong, C., Zheng, W., He, Y., Gao, Z. Microstructure, adhesion, mechanical and corrosion properties of TiN coatings deposited by high energy pulse-enhanced vacuum arc evaporation, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2020, vol.

34, iss. 10, pp. 1040-1061. DOI: 10.1080/01694243.2019.1690774.

3. Sysoyev, Yu. O., Shyrokyj, Yu. V., Torosyan E. V. Pidvyshhennya efektyvnosti zapalyuvannya vakuumno-dugovogo rozryadu v dzherelax plazmy [Increasing the ignition efficiency of vacuum-arc discharge in plasma sources] *Aviacijno-kosmichna texnika i tehnologiya*, 2022, no. 2(178), pp. 47–54. DOI: 10.32620/aktt.2022.2.06.

4. 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. Zhukovskogo «Harkiv. aviac. in-t» Publ., 2021. 320 p.

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

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

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

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

9. Boxman, R. L., Sanders, D. M., Martin, Ph. J. (Eds.). *Handbook of Vacuum Arc Science and Technology*. Noyes Publications, Park Ridge, NJ, USA, 1995. 742 p.

10. Belevskii, V. P. Kuz'michev, A. I., Masalitin, E. F. *Impul'snaya ionnaya obrabotka i osazhdenie tonkikh plenok i pokrytii* [Pulsed ion processing and deposition of thin films and coatings]. Kiev, Obshchestvo «Znanie» Ukrainy Publ., 1991. 22 p.

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

12. Nedospasov, A. V. *Fizika pristenochnoi plazmy v tokamakakh* [Physics of near-wall plasma in tokamaks] *Uspekhi fiz. nauk*, 1987, vol. 152, no. 3, pp. 479-492.

13. Farrel, Dzh. Initsiatsiya vakuumnoi dugi [Vacuum arc initiation]. V kn. *Vakuumnye dugi*, red. Dzh. Lafferti. Moscow, Mir Publ., 1982, pp. 108–152.

14. Baranov, M. I. *Primenenie novykh gazozaryadnykh i tverdotel'nykh poluprovodnikovyx kommutatorov v sil'notochnykh tsepyakh moshchnykh vysokovol'tnykh elektrofizicheskikh ustanovok* [Application of new gas-discharge and solid-state semiconductor

switches in high-current circuits of powerful high-voltage electrophysical plants]. *Elektrotehnika i elektromekhanika*, 2009, no. 1, pp. 55–58.

15. Aksenov, I. I., Padalka, V. G., Khoroshikh, V. M. *Formirovanie potokov metallicheskoj plazmy : obzor* [Formation of metal plasma streams : review]. Moscow, TsNIIatominform Publ., 1984. 83 p.

16. Sysoev, Yu. A. *Avtomatizirovannaya sistema izmereniya temperatury dlya vakuumnykh mnogotselevykh tekhnologicheskikh ustanovok* [Automated temperature measurement system for vacuum multi-purpose process plants]. *Novye tekhnologii v mashinostroenii Tr. V Mezhdunar. konf. Rybach'e, 3-8 sent.* 1996. Khakov, KhAI Publ., 1996, pp. 285–287.

17. Volkov, V. V., Miroshkin, S. I., Shalimov, S. V., Savel'ev, A. A. *Sposob polucheniya pokrytii v vakuume, ustroistvo dlya polucheniya pokrytii v vakuume, sposob izgotovleniya ustroistva dlya polucheniya pokrytii v vakuume* [Vacuum Coating Method, Vacuum Coating Device, Vacuum Coating Device Manufacturing Method]. Pat. RF, no. 2176681, 2001.

18. Scheibe, H.-J., Dreschner, D. Preparation of diamond-like films by laser-controlled arc deposition (LASER – ARC). *Thin Films Proc. of the joint 4th Int. Symp. TATF'94 and the 11th Conf. HVTF'94*, Dresden, march 7–11, 1994, pp. 139–142.

19. Aksenov, I. I., Sysoev, Yu. A. *Primenenie penningovskogo razryada dlya zazhiganiya dugi v tekhnologicheskikh istochnikakh plazmy* [Application of the Penning Discharge for Arc Ignition in Technological Plasma Sources] *Ionno-plazmennye ustanovki dlya tekhnologicheskikh tselei, sb. nauch. tr.* Khakov, KhAI Publ., 1988, pp. 16–21.

20. Sysoev, Yu. A. *Primenenie dielektricheskikh stimulyatorov katodnogo pyatna dlya возбуждения дуги тлеющего разряда в технологических источниках плазмы* [Application of dielectric cathode spot stimulators for excitation of an arc by a glow discharge in technological sources of plasma]. *Ionno-plazmennye ustanovki dlya tekhnologicheskikh tselei, sb. nauch. tr.*, Khakov, KhAI Publ., 1988, pp. 22–27.

21. Aksenov, I. I., Sysoev, Yu. A., Khoroshikh V. M. *Vakuumno-dugovoe plazmennoe ustroistvo dlya nanoseniya pokrytii* [Vacuum arc plasma coating machine. Pat. USSR, no. 1235449, 1986.

22. Sysoev, Yu. A. *Tekhnologicheskii istochnik plazmy s kombinirovannoi sistemoi возбуждения вакуумно-дугового разряда* [Technological plasma source with a combined vacuum-arc discharge excitation system]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki*, 2013, no. 5(87), pp. 154–157.

23. Sysoev, Yu. O., Kostyuk, G. I. *Vakuumno-dugovyj prystrij dlya nanoseniya pokrytii* [Vacuum-arc device for applying coatings]. Pat. UA, no. 107598, 2015.

24. Rideal, Eric K. *Concepts in Catalysis*. Academic Press Publ., 1968. 194 p.

25. *Khimicheskaya entsiklopediya. V 5 t.* [Chemical Encyclopedia. In 4 vol.]. Moscow, Bol'shaya Rossiiskaya entsiklopediya. Publ., 1995, vol. 4, Pol-Tri Publ. 639 p.

26. Bykov, Yu. A., Karpukhin, S. D., Gazukina, E. I. *O nekotorykh osobennostyakh struktury i svoystv metallicheskih "tonkikh" plenok* [On some features of the structure and properties of metallic "thin" films]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2000, no. 6, pp. 45–47.

Надійшла до редакції 12.04.2022, розглянута на редколегії 27.07.2022

IGNITION OF A VACUUM ARC DISCHARGE IN PLASMA SOURCES BY NON-TRADITIONAL METHODS

Iurii Sysoiev, Yurii Shyrokyi, Andrey Sysoiev

The **subject** of research in this article is the processes of excitation of a vacuum-arc discharge in plasma sources by unconventional methods: the transition of a glow discharge into an arc discharge (TGA) and arc initiation using laser radiation (LR). The **goals** are to increase the service life of ignition systems (IS) for plasma sources to expand their technological capabilities and the quality of the resulting coatings. The **tasks**: to investigate the modes in which non-traditional IS stably excite an arc discharge and ensure their high service life. The **methods** used are analytical and experimental research methods, which were carried out using the developed new devices. The following **results** have been obtained. The study of arc excitation using a TGA in a system of Penning-type electrodes showed that the use of a plasma source with such an IS is advisable in processes in which reaction gases are used to form compounds with its material on the cathode surface. Otherwise, after several hundred triggering, the probability of PTD decreases to values of 10...50 %, which is explained by the cleaning of the cathode surface from various inhomogeneities. The ignition of the TGA arc using dielectric stimulators of the cathode spot (CS) expands the technological capabilities of the plasma source. Here, the arc discharge stably ignites in the pressure range from 10^{-2} to 10 Pa, with voltage pulses of the order of 2 kV in a magnetic field with a strength of $5.6 \cdot 10^4$ A/m and a starting pulse energy of 2 J. The design of a plasma source with a combined IS has been developed, which makes it possible to achieve the maximum reliability of the excitation of a vacuum arc. A plasma source with a combined IS has a reliability of starting the device in

the pressure range of $10^{-2} \dots 5$ Pa, the presence of a magnetic field of $10^4 \dots 10^5$ A/m and amplitude of starting pulses of 1.5...2.0 kV close to 100%. The conditions under which the formation of vapor condensate of the plasma source cathode material on the surface of the LR input window does not occur are considered, and it is proposed to solve this problem by supplying energy to the condensation zone directly to the formed condensate layer. **Conclusions.** The use of non-traditional methods of excitation of a vacuum-arc discharge was substantiated and studied: using TGA and LR, a combined IS was developed, in which traditional and non-traditional methods of arc ignition are combined using the advantages of each method, parameters were found under which the IS work under study reliably and have high resource.

Keywords: Vacuum arc; Vacuum-arc discharge ignition system; excitation systems based on the transition of a glow discharge into an arc discharge.

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

Сисоєв Андрій Юрійович – канд. техн. наук, старш. викл. каф. теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Iurii Sysoiev – 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: 0000-0001-5006-8546.

Yurii Shyrokyi – Doctor of Philosophy, Assistant-Professor, Head 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.

Andrey Sysoiev – Doctor of Philosophy, Senior Lecturer, Head of Department of Theoretical Mechanics, Engineering and Robomechanical Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: i.sysoiev@khai.edu.