

ПРОБЛЕМИ ТА ЇХ ВИРІШЕННЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ПАРОВОДЯНИХ ПЛАЗМОТРОНІВ ПІДВИЩЕНОЇ ПОТУЖНОСТІ

С.В. Петров

Інститут газу НАН України. 03113, м. Київ, вул. Дегтярівська, 39. E-mail: vizana.sp@gmail.com

Реалізація нових технологій багатотоннажної плазмохімії потребує розробки надійних високоресурсних плазмотронів підвищеної потужності. В процесі роботи плазмотрона найбільш інтенсивному зношуванню підлягає катод, ресурс анода вище приблизно в два рази. Розроблено оригінальні конструкції пароводяних плазмотронів непрямої дії з застосуванням двох типів катодних вузлів — вольфрамовим (ПЛР-3П) та мідним трубчатим (ПЛР-4П). В останньому низький рівень ерозії трубчатого катода забезпечується розподілом теплового потоку від точки опори дуги на велику область внаслідок її швидкого руху (~ 100 м/с) завдяки газодинамічним і магнітним силам, що діють на радіальну ділянку дуги. При цьому дугова пляма сканує робочу поверхню електрода, перебуваючи між аеродинамічною та магнітною площинами. При роботі плазмотрона ПЛР-4П на струмі 300 А ерозія катода складала для повітря $9 \cdot 10^{-7}$ г/Кл, а для водяної пари — $3 \cdot 10^{-7}$ г/Кл. Крім того, з водяним паром поверхня катода залишається чистою і рівень ерозії не залежить від часу роботи, а при роботі на повітрі поверхня покривається чорною плівкою закису міді (CuO). Встановлено, що внаслідок флуктуацій струму і напруги, газодинамічної нестійкості вихрової течії в глухому електроді можливе самопогасіння електричної дуги. Щоб уникнути самопогасіння електричної дуги для живлення пароводяних плазмотронів підвищеної потужності (100...500 кВт) слід застосовувати 12-фазні схеми випрямлення. Бібліогр. 27, рис. 6.

Ключові слова: пароводяний плазмотрон; трубчатий катод; ерозія; магнітно-вихрова стабілізація дуги; самопогасання дуги

Доведено, що використання пароводяної плазми значно підвищує ефективність процесів газифікації [1–4], конверсії різних видів вуглецевмісної сировини [5, 6], а також питомий вихід рідких палив [7] і водню [8, 9]. Причому збільшення їх виходів досягається з підвищенням частки водяної пари, а зростання тепловмісту призводить до зменшення баластних домішок (CO_2 , N_2) в синтезі газу. Присутність пари в реакторі забезпечує підвищення ефективності крекінгу і каталітичної конверсії смол [10, 11]. Пароводяна плазма в залежності від температури складається з водню, кисню та їх похідних (H , O , OH , H^+ , O^+ , O^{++}) і електронів. Такий склад визначає її плазмохімічні та теплові взаємодії з іншими речовинами. А саме, в пароводяній плазмі водень і кисень в рівній мірі приймають участь в процесах газифікації, у котрих утворений синтез газу ($\text{CO} + \text{H}_2$) вміщує найбільшу кількість водню за рахунок повного запозичення його із H_2O . Пароводяна плазма не вміщує токсичні компоненти типу NO_x в відмінності від повітряної плазми. Пароводяна плазма з успіхом може бути розповсюджена також на атомні електростанції в їх головному напрямку, пов'язаному з отриманням ядерного палива, яким є пресовані із діоксиду урану (UO_2) таблетки. Виконані дослідження з використання пароводяних плазмотронів [12] показують, що найкращою технологією виробництва ядерно-

го палива є технологія з участю електродугових пароводяних плазмотронів. Таким чином, пароводяна плазма, як найбільш доступна, невибухобезпечна і високоентальпійна, може з успіхом використовуватись в різних технологічних процесах.

Найбільш ефективними пристроями для отримання водяної пари з підвищеними термодинамічними властивостями є електродугові плазмотрони. В основному сучасні парові плазмотрони працюють на постійному струмі. З історичної точки зору в першу чергу заслуговують увагу водостабілізовані плазмові пальники, які впродовж декількох десятиліть розроблялися в Інституті фізики плазми Чеської академії наук [13, 14] (потужність 30...130 кВт, струм 200...500 А). Такі плазмотрони генерують високоентальпійну плазму водяної пари і їх основне застосування призначається для плазмового наплення захисних покриттів. Також вони мають перспективу застосування для переробки відходів і газифікації біомаси з отриманням синтезу газу. Узагальнюючі дослідження різних авторів в галузі технологічного застосування пароводяної плазми наведені в роботі [15]. Слід зазначити, що особлива увага наділяється пароводяній плазмі, отриманої в електродугових плазмотронах. Досвід свідчить, що саме за цим способом плазмогенерації велике майбутнє, оскільки, володіючи високим коефіцієнтом корисної дії, електродугові плазмотрони практично не мають обмежень як по потужності, так і витратам плаз-

С.В. Петров — <https://orcid.org/0000-0003-0373-8003>

© С.В. Петров, 2021

ISSN 2415-8445 СУЧАСНА ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЯ, № 2, 2021

19

моутворюючого середовища, що особливо важливо для багатотоннажного виробництва.

В результаті розробки конструкцій і схем парових плазмотронів різного призначення фірмою «ЕПОС-Інженіринг» в 1980–2019 рр. створений уніфікований ряд плазмотронів для плазмохімії потужністю 50, 100, 500 кВт [16]. Компанія «High Temperature Technologies Corp» (Канада) пропонує для газифікації різних відходів паровий плазмотрон Model PPT-ST-Steam Plasma Arc Torches потужністю 50...200 кВт [17]. Інша Канадська компанія «PyroGenesis» розробила і пропонує систему пароплазмового крекінгу хімікатів SPARC-10™ для холодоагенту продуктивністю 50 кг/год з паровим плазмотроном SPT™ [18]. Такий перелік пропозицій для застосувань пароводяних плазмотронів можна продовжувати. Разом з тим промислова реалізація нових технологій багатотоннажної плазмохімії гальмується і потребує розробки надійних високоресурсних плазмотронів підвищеної потужності. При цьому слід зауважити, що інтуїтивна націленість на створення плазмового обладнання з максимальним ресурсом не завжди є обґрунтованою для конкретних технологічних процесів. Не безпідставно автори роботи [19] вважають, що для кожного із можливих застосувань плазмового обладнання доцільно визначати необхідний рівень ресурсу, виходячи з циклічності роботи всієї технологічної лінії, в якій воно використовується. Очевидно, що гарантований ресурс плазмового обладнання на такому виробництві повинен складати величину кратну

міжрегламентному циклу, який в більшості випадків становить тривалість порядку тисячі годин. Незважаючи на те, що дослідження в галузі технологічних плазмотронів підвищеної потужності проводяться протягом багатьох років, на теперішній час не створено плазмове обладнання, яке б в повній мірі відповідало вимогам промисловості. Саме відсутність плазмотронів з достатнім рівнем надійності та ресурсу вважається основною причиною стримування масового використання плазмових технологій, відпрацьованих на експериментальних установках. Максимальний ресурс, що наводять виробники плазмового обладнання в своїх рекламних матеріалах (наприклад AquaSource Technologies Corp. [20]) має бути 750...3500 год при потужності електродугового плазмотрона непрямої дії типу MARC-11 300...3000 кВт.

На теперішній час створено чимало життєздатних конструкцій технологічних електродугових плазмотронів, а результати досліджень останніх років свідчать про позитивну тенденцію підвищення їх ресурсу та надійності. Електродугові плазмотрони вміщують електроди, які з часом необхідно замінити внаслідок ерозії на дугових плямах. В процесі роботи плазмотрона найбільш інтенсивному зношуванню підлягає катод, ресурс анода вище приблизно в два рази. Плазмотрон може також вийти з ладу внаслідок інших технічних причин, таких як прогоряння ізоляторів, порушення в системах охолодження і газопостачання. Основні зусилля розробників зосереджуються на катоді. У пароводяних плазмотронах непрямої дії можуть застосовуватись два типи катодних вузлів.

Перший тип — плазмотрон для пароплазмової переробки відходів ПЛР-ЗП потужністю 160 кВт з вольфрамовим термокатодом (рис. 1). Працює на чистому повітрі, суміші повітря з паром та чистому пару і складається з трьох основних частин: рекуперативного підігрівача пару, катодного з сопловою вставкою та колектором і анодного вузлів.

Колектор катодного вузла складається з корпусу 1 стандартного розподільника плазмотрону для повітряно-плазмової різки типу ВПР-15 та кабель-шлангового пакету для подачі та відводу охолоджувальної води, підводу захистного газу (Ar), підводу напруги на катод та сопло та висковольтний провід для підпалення чергової дуги.

Вузол катодний складається з корпусу 9, всередині якого розташовано катодотримач 2, в якому за допомогою цангового затискача та гайки 4, встановлено вольфрамовий стрижневий катод 8. Катод має можливість пересуватися в осьовому напрямку для встановлення необхідного робочого проміжку між ним та розподільчою діафрагмою 5,

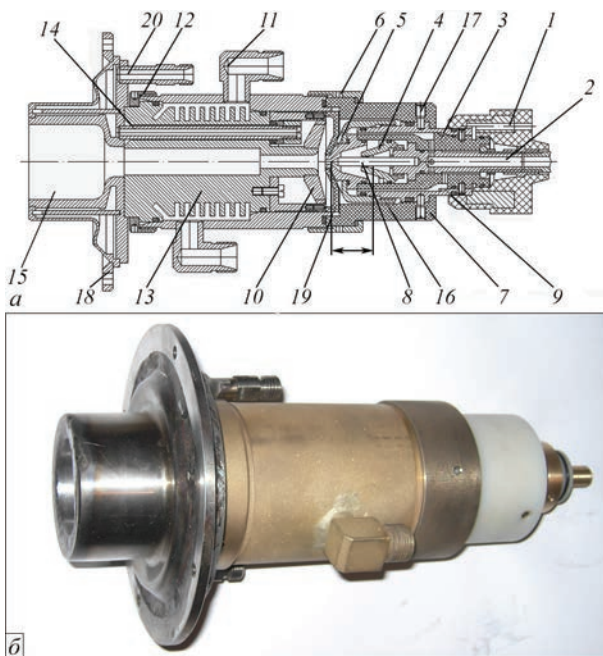


Рис. 1. Плазмотрон для пароплазмової переробки відходів ПЛР-ЗП потужністю 160 кВт: а — схема; б — загальний вигляд; 1–20 див. в тексті

яка затискається гайкою 16 до ізоляційного корпусу 3. Корпус ізоляційний, розташований між корпусом 9 і катодотримачем 2, одночасно являється розподільником для підводу/відводу охолоджувальної води. Через корпус і гайку підводиться високовольтна напруга до діафрагми 5 від розподільника 1. До корпусу за допомогою гвинтів 17 закріплено ізоляційний корпус 7 з накидною гайкою 6 для приєднання анодного вузла. Між катодним та анодним вузлами розташована проставка керамічна 19, яка служить захисним термобар'єром між перегрітою парою та охолодженою діафрагмою. Вузол катодний приєднується до розподільника за допомогою різьбової частини з різьбою М12.

Вузол анодний складається з корпусу 11 із штуцерами, які служать для токопідводу та підводу/відводу охолоджувальної води через кабель-шланговий пакет. В корпусі 11 за допомогою накидної гайки 12 встановлено сопло-анод 13, в вхідній частині котрого розміщений завихрювач 10. До вихідної частини сопла-анода приєднана рекуперативна насадка 15, яка призначена для подачі повітря та пари до дугової камери плазмотрону. Насадка рекуперативна складається із зварного корпусу 15, приєднувальних трубок 14 та двох штуцерів 20 для підведення спочатку повітря та, після прогріву насадки, водяної пари. Насадка також має фланець 18 для встановлення всього плазмотрону у плазмотронний блок, який щільно закріплюється на корпусі печі.

Другий тип — плазмотрон ПЛР-4П для пароплазмової газифікації потужністю 180 кВт. Працює на чистому повітрі, суміші повітря з паром та чистому пару і складається з трьох основних частин: вузла катодного, вставки міжелектродної та вузла анодного.

Вузол катодний складається з корпусу 1, який має штуцери для підводу/відводу охолоджуючої води та напруги через кабель-шланговий пакет. Всередині корпусу встановлено трубчатий катод 2. Із зовнішньої сторони корпусу 1 встановлено віконце 3 з кварцового скла, з внутрішньої сторони катоду — катод проміжний 4 через термопроставку 14.

Рекуперативна міжелектродна вставка (МЕВ) складається з корпусу 8 із штуцерами для подачі плазмоутворюючого повітря та водяної пари, а також підводу високовольтної напруги від осцилятора для підпалювання чергової дуги. В корпусі 8 встановлено завихрювач 15 зафіксований болтом стопорним 16.

Вузол анодний складається з корпусу 10, який також має штуцери для підводу/відводу охолоджуючої води та напруги через кабель-шланговий пакет. Всередині корпусу 10 встановлено анод пу-

стотілий 12, з внутрішньої сторони якого встановлено анод проміжний 9 через термопроставку 14.

Всі три основні вузли з'єднуються між собою гвинтами 6 через корпуси ізолюючі 5 та проставки керамічні 7. Зовні катодного та анодного корпусів встановлено комплект постійних магнітів 11. Для можливості встановлення плазмотрону у робочу камеру плазмотрон закріплений на приєднувальному фланці 13.

Плазмотрон ПЛР-4П працює наступним чином. Подаються охолоджувальна вода та плазмоутворююче повітря. При запуску плазмотрону спочатку запалюється чергова дуга в мінімальному проміжку між проміжним катодом 4 і завихрювачем МЕВ шляхом електричного пробую міжелектродного проміжку за допомогою осцилятора. Плазмоутворююче повітря подається в розрядну камеру через тангенціальне різьблення в завихрювачі МЕВ. Чергова дуга, що виникла, виноситься повітряним вихором з міжелектродного проміжку й розтягується по осі розрядної камери. Як тільки витікаючий через МЕВ потік плазми торкається проміжного аноду 9, збуджується робоча дуга, а ланцюг чергової дуги розмикається контактом джерела електроживлення. По мірі прогріву внутрішньої робочої зони плазмотрону подача стислого повітря в МЕВ плавно замінюється на подачу водяної пари. Обдуваючи розташовану по осі камери електричну дугу, робочий газ нагрівається й через сопло витікає назовні у вигляді високотемпературного й високошвидкісного плазмового потоку.

Конструктивно торцеві поверхні катода 2 та анода 12, виконані із застосуванням так званих термічних лінз, які утворені за допомогою деталей 4, 14 для катода та деталей 9, 14 для анода. Вони одержують тепло випромінювання електричної дуги й фактично охолоджуються перегрітою парою. Таким чином, дуговий канал у зоні горіння дуги по осі працює в режимі рекуперативного охолодження, а тепло, отримане електродами від дуги, вертається в плазмоутворюючу пару. Зони прив'язки катодної і анодної опорних плям інтенсивно охолоджуються водою. Робота плазмотрона заснована на стабілізації стовпа електричної дуги уздовж осі дугового каналу вихровим потоком пари (повітря) і створенні умов переміщення катодних і анодних опорних плям по поверхні з великою (~ 100 м/с) швидкістю. Таким чином, незважаючи на високу температуру в дузі (~ 15000 °С), вона не оплавляє електроди плазмотрона. Щодо стінок каналу дуга ізолювана відносно прохолодним газом (повітрям або парою), а швидке переміщення опорних її плям по поверхні знижує щільність теплового потоку до припустимих значень. З метою інтенсифікації переміщення опорної плями дуги по внутрішній поверхні електродів на

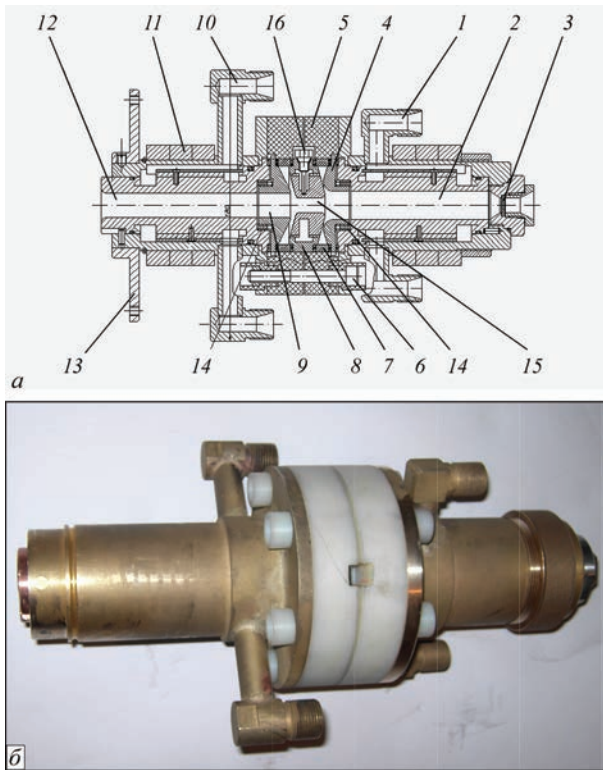


Рис. 2. Плазмотрон пароповітряний ПЛР-4П з трубчатими електродами: а — схема; б — загальний вигляд; 1–16 див. в тексті

зовнішніх поверхнях катодного 1 та анодного 10 корпусів встановлено комплекти постійних магнітів 11.

Обидва способи підвищення ресурсу катода плазмотронів (рис. 1, 2) не можуть повністю виключити ерозійне зношення. Використання трубчатих електродів (рис. 2) вважається більш перспективним внаслідок їх невибірковості до роду плазмоутворюючого середовища, роду та величини струму, слабкої чутливості до підвищення тиску. В теперішній час склалося стійке уявлення, що головною причиною руйнування електродів в контрагованому дуговому розряді є термічний вплив опорних плям на поверхню металу [21]. Незважаючи на ефективний розвиток техніки з використанням електричної дуги і велику кількість досліджень, переконливого опису всієї сукупності явищ в прикатодній зоні електричного розряду атмосферного тиску на холодному електроді не існує. Найбільш суттєві механізми ерозії, викликані електричним розрядом, наступні [22]:

під впливом тепла іонного бомбардування на мікроскопічній поверхні катода утворюється тонка плівка розплавленого металу. Значна її кількість виноситься на край кратера тоді, коли менша частина викидається в вигляді мікрокрапель;

випаровування матеріалу катода — важливе явище, що сприяє самопідтриманню дугових розрядів на холодному катоді;

розпилення атомів з поверхні — один з ймовірних механізмів, що відповідають за електродну ерозію. Розпилення викликається бомбардуванням поверхні катода прискореними іонами та швидкими атомами;

видалення оксидного шару з кратера. Вважається, що опір поверхні катода дуговій ерозії сильно залежить від наявності оксидного шару;

плазмове окислення в деяких випадках може бути домінуючим ефектом зношення матеріалу катода.

Оскільки доведено, що дугова ерозія напряму пов'язана з утворенням мікрократерів на поверхні катода, то для таких матеріалів як мідь і срібло вона здійснюється за рахунок випаровування і викидів рідини. Достатнім охолодженням і швидким переміщенням радіальної ділянки дуги більшість вказаних процесів можна подавити. А випаровування обійти неможливо тому, що катод піддається впливу концентрованого джерела тепла з щільністю потужності в діапазоні від 10^{10} до 10^{12} Вт/м² впродовж 0,1...10 мкс на поверхні радіусом до 10 мкм.

Відносно низький рівень ерозії трубчатого катода забезпечується розподілом теплового потоку від точки опори дуги на велику область внаслідок її швидкого руху завдяки газодинамічним і магнітним силам, які діють на радіальну ділянку дуги. В плазмотроні ПЛР-4П (рис. 2) з магнітно-вихровою стабілізацією дуги оптимальна ерозія досягається коректним вибором швидкості обертання її прикатодної ділянки під впливом газового вихору і магнітного поздовжнього сканування (автосканування) [23]. При цьому радіальна прив'язка дуги буде під дією магнітного поля прискорюватись в тангенціальному напрямку і втягуватись в його площину. В вихровому плазмотроні прив'язка дуги в торцевому трубчатому електроді здійснюється в місті зустрічі циркуляційних течій. Вона обертається газовим потоком в перетині, умовно названим аеродинамічною площиною. В нашому випадку аеродинамічна і магнітна площини не співпадають. Обертання дугової прив'язки здійснюється за рахунок газового вихору і тангенціальної складової пондемоторної сили. В урівноваженому стані, теоретично, осьове переміщення припиняється і прив'язка дуги обертається в проміжному перетині десь між аеродинамічною та магнітною площинами. В дійсності такої рівноваги досягти неможливо. Тому разом з тангенціальним поздовжнім зворотно-поступальний рух має здійснюватися безперервно. При цьому дугова пляма сканує робочу поверхню електрода, перебуваючи між аеродинамічною та магнітною площинами.

Дослідження плазмотрона ПЛР-4П (рис. 2). Електроживлення здійснювалось від тиристорного перетворювача з напругою холостого ходу 650 В.

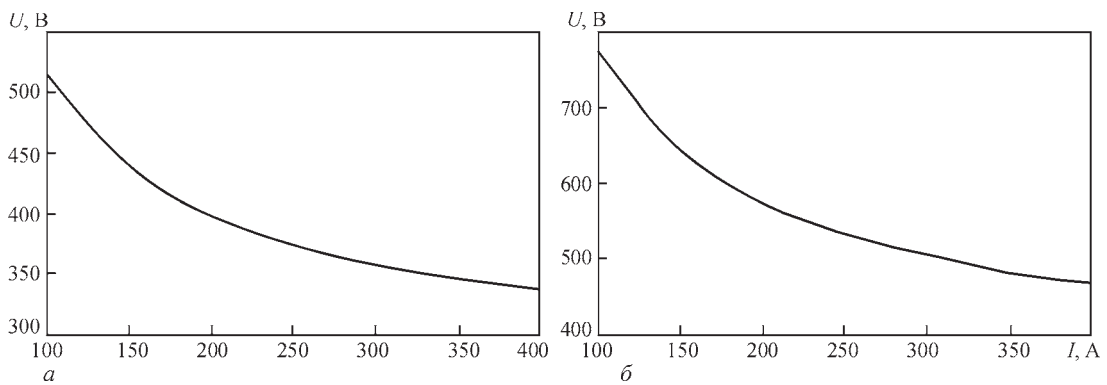


Рис. 3. Залежність напруги на дузі від струму при витратах 5 г/с: а — повітря; б — пар

Плазмутворююче середовище — повітря, водяна пара та суміш повітря з водяною парою з витратами від $4 \cdot 10^{-3}$ до $12 \cdot 10^{-3}$ кг/с, діаметр катода (d_1) від $2 \cdot 10^{-2}$ до $3 \cdot 10^{-2}$ м, діаметр анода (d_2) від $1 \cdot 10^{-2}$ до $2 \cdot 10^{-2}$ м, струм (I) від 100 до 500 А, тиск газу (p) ($1,0 \dots 1,5$) 10^5 Па. Матеріал електродів — мідь М0.

На рис. 3 наведені типові вольт-амперні характеристики плазмотрона ПЛР-4П. Проведені дослідження показали, що реальна потужність таких плазмотронів може досягати багатьох сотен кіловат. З переходом до водяної пари напруга підвищувалася. Теплові втрати вимірювали калориметруванням охолоджуючої води. Коефіцієнт корисної дії плазмотрона складав 0,7...0,8, за рахунок оптимізації довжини електродів його можна підвищувати.

Проведені дослідження питомої ерозії електродів описуються формулою $G = \Delta m / (It)$, кг/Кл, де Δm — маса вигорілого металу, t — час. Внутрішній трубчатий електрод підключали до негативного полюсу джерела живлення (катода), а вихідний — до позитивного (анода).

В торцевій кришці катода встановлено віконце з кварцового скла, через яке проводили зйомку радіальної ділянки дуги в порожнині трубчатого катода. Вибір розташування зони сканування в катоді здійснювали шляхом визначення аеродинамічної та магнітної площин окремо (рис. 4).

При великій швидкості обертання без сканування катодна пляма потрапляє в неостиглий слід попереднього обороту і матеріал оплавляється. Оптимізація полягає в тому, щоб здійснити поверхневу швидкість катодної дугової плями на рівні 50...150 м/с [24] та розтягнути зону її сканування вздовж поверхні катода на задану довжину. Тоді оплавлення виключається, а на поверхні після роботи залишаються тільки сліди мікрократерів від безперервного переміщення катодної плями, не дозволяючи їй затримуватись на одному місці більше ніж на $10^{-3} \dots 10^{-4}$ с і не допускаючи локального перегріву.

Швидкість руху катодної плями можна оцінити з осцилограм (рис. 5). На рис. 5, а дугова пляма описує замкнуту кругову траєкторію в перетині прив'язки дуги в місті зустрічі циркуляційних потоків і її середня довжина не змінюється. За рахунок подовження дуги при скануванні (рис. 5, б) напруга змінюється приблизно на 100 В, при середньому градієнті 30 в/см зона сканування складатиме біля 3 см. З урахуванням гвинтової траєкторії шлях пробігу складатиме приблизно 5 см за $5 \cdot 10^{-4}$ с. При цьому середня швидкість буде біля 100 м/с і пляма весь час рухатиметься по вже охолодженій поверхні, а не по своєму гарячому сліду.

При роботі плазмотрона ПЛР-4П на струмі 300 А впродовж 30 год ерозія катода складала для повітря $9 \cdot 10^{-7}$ г/Кл, а для водяної пари $3 \cdot 10^{-7}$ г/Кл. При цьому очікуваний ресурс катода становив до 1000 год. Крім того, з водяним паром поверхня катода залишалася чистою і рівень ерозії не залежав від часу роботи, а при роботі на повітрі поверхня покривалася чорною плівкою закиси міді CuO . Подальші



Рис. 4. Прив'язка опорної плями дуги на катоді в області аеродинамічної (а) та магнітної (б) площин без сканування

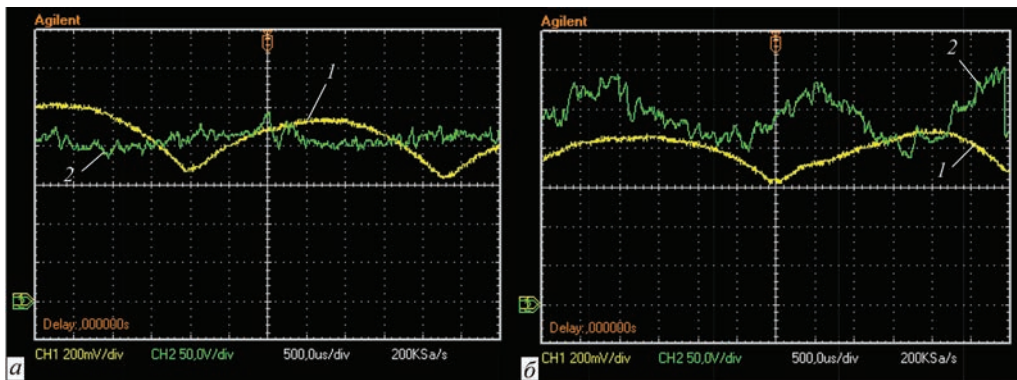


Рис. 5. Осцилограми струму (1) і напруги катод–МЕВ (2) при роботі плазмотрона ПЛР-4П; а — аеродинамічна; б — магнітно-вихрова стабілізації дуги. Струм — 300 А, напруга катод–МЕВ — 200 В, напруга катод–анод — 450 В, витрати водяної пари — $4 \cdot 10^{-3}$ кг/с

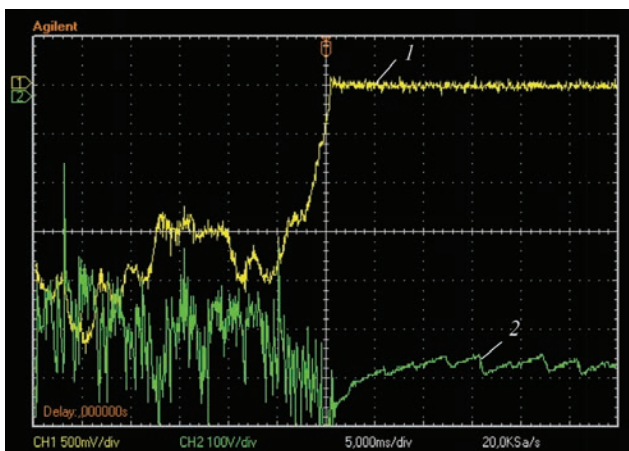


Рис. 6. Самопогасіння електричної дуги: 1 — струм; 2 — напруга

кроки підвищення ресурсу трубчатих електродів пов'язуються з використанням нових матеріалів з підвищеною втомною міцністю при імпульсних теплових і механічних навантаженнях [25–27].

В плазмотронах підвищеної потужності за рахунок розтягнення електричної дуги і інтенсифікації її охолодження з переходом до водяного пару напруга підвищується (див. рис. 3), а постійна часу зменшується, тому зростають вимоги до динамічних характеристик джерела живлення. Плазмотрон з трубчатими електродами працює в умовах безперервних перехідних процесів, тому дуга в ньому менш стабільна. Внаслідок флуктуацій струму і напруги, газодинамічної нестійкості вихрової течії в глухому електроді можливе самопогасіння електричної дуги (рис. 6).

Щоб уникнути самопогасіння електричної дуги для живлення пароводяних плазмотронів підвищеної потужності (100...500 кВт) слід застосовувати 12-фазні схеми випрямлення. В цілому розроблена плазмова система, незважаючи на складність і різноманіття процесів, що протікають, базується на простих і перевірених на практиці алгоритмах. Плазмово-парова установка в складі автоматизо-

ваного комплексу легко піддається керуванню, що зводиться до її інтеграції в технологічну силову схему в якості незалежного елемента.

Висновки

1. Показано, що паровий плазмотрон підвищеної потужності є доведений унікальний і універсальний інструмент для проведення різноманітних технологічних процесів. Розроблено оригінальні роботоздатні конструкції.

2. Для створення таких промислових плазмотронів необхідно виконати ряд робіт в наступних галузях: створення спеціалізованих джерел електроживлення, охолодження, газозабезпечення, автоматизованих систем управління, матеріалознавства та ін. Ніяких фундаментальних причин, які б не дозволили рухатись в цьому напрямку не існує.

Список літератури/References

- Rutberg, Ph.G., Bratsev, A.N., Kuznetsov, V.A. et al. (2011) On efficiency of plasma gasification of wood residues. *Bio-mass Bioenergy*, 35(1), 495–504.
- Petrov, S.V., Katircioğlu, T.Y. (2020) *Technological aspects of steam and water plasma*. OmniSkriptum Publishing Group.
- Hrabovsky, M., Hlina, M., Konrad, M. et al. (2013) Steam plasma-assisted gasification of organic waste by reactions with water, CO₂ and O₂. In: *Proc. of 21st Intern. Sym. on Plasma Chemistry ISPC 21, (4–9 August 2013, Cairns Convention Centre, Queensland, Australia)*.
- Kaushal, P., Tyagi, R. (2012) Steam assisted biomass gasification: An overview. *Can. J. Chem. Eng.*, 90(4), 1043–1052.
- Bratsev, A.N., Kuznetsov, V.A., Popov, V.E. et al. (2009) Estimation of perspectivity of steam plasma methane conversion. *High Temp. Mater. Processes*, 13(2), 241–246.
- Narengerile, H. Saito, Watanabe, T. (2010) Decomposition mechanism of fluorinated compounds in water plasmas generated under atmospheric pressure. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 6, 17.
- Petrov, S.V. (2021) *Innovative plasma jet technologies*. LAP Lambert Academic Publishing.
- Tamosiunas, A., Valatkevicius, P., Valincius, V., Levinskas, R. (2016) Biomass conversion to hydrogen-rich synthesis fuels using water steam plasma. *Comptes Rendus Chimie*, 19(4), 433–440.

9. Galvitaa, V., Messerle, V.E., Ustimenko, A.B. (2007) Hydrogen production by coal plasma gasification for fuel cell technology. *Int. J. of Hydrogen Energy*, **32**, 3899–3906.
10. Tao, K., Ohta, N., Liu, G. et al. (2010) *Plasma enhanced catalytic reforming of biomass tar model compound to syngas*. Fuel. Available online. doi:10.1016/j.fuel.2010.05.044.
11. Shiyun, Liu, Danhua, Mei, Li, Wang, Xin, Tu (2017) Steam reforming of toluene as biomass tar model compound in a gliding arc discharge reactor. *Chemical Engineering J.*, **307**, 793–802.
12. Toumanov, Y.N. (1989) *Low-temperature plasma and high-frequency electromagnetic fields in the process of obtaining materials for nuclear power*. Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
13. Hrabovsky, M. (1998) Water-stabilized plasma generators. *Pure and Applied Chemistry*, **70**(6), 1157–1162.
14. Hrabovsky, M. (2009) Thermal plasma generators with water stabilized arc. *The Open Plasma Physics J.*, **2**(1), 99–104.
15. Mikhajlov, B.I. (2002) Prospects of practical application of arc steam-water plasma. *Teplofizika i Aeromekhanika*, **9**(1), 1–16 [in Russian].
16. Plasma technologies. <https://epos-nsk.ru/portfolio-category/plazmennye-tehnologii/>
17. Model PPT-ST — steam plasma arc torches. <https://www.energyxprt.com/products/model-ppt-st-steam-plasma-arc-torches-538911>
18. (2016) *Steam plasma arc refrigerant cracking system (SPARC-10™)*. <https://streblenergy.com/2016/06/17/steam-plasma-arc-refrigerant-cracking-system-sparc-10tm/>
19. Krivtsov, V.S., Plankovsky, S.I. (2005) Problems of development of long-life high-current electric arc plasmotrons. *Aviats.-Kosmich. Tekhnika i Tekhnologiya*, **7**, 7–20 [in Russian].
20. *MARC-11 Plasma Torch*. <https://aquasourcetechnologies.com/marc-11-plasma-torch/>
21. Anshakov, A.S., Urbakh, E.K., Cherednichenko, V.S. et al. (2012) Development and investigation of arc plasmotrons for heating of air with long service life. *Energotehnologii i Resursosberezenie*, **5**, 4–8 [in Russian].
22. Jeanvoine, N. (2009) *Plasma — material interaction and electrode degradation in high voltage ignition discharges*: Dissertation zur Erlangung des Grades des Doktors der Ingenieurwissenschaften. Saarbrücken, 166.
23. Mikhajlov, B.I. (2008) Autoscanning in plasmotrons with magnetic vortex arc stabilization. *Teplofizika i Aeromekhanika*, **15**(3), 551–553 [in Russian].
24. Essiptchouk, A.M., Marotta, A., Sharakhovsky, L.I. (2004) The effect of arc velocity on cold electrode erosion. *Phys. Plasmas*, **11**(3), 1214–1219.
25. Benilov, M.S., Cunha, M.D., Hartmann, W. et al. (2013) Space-resolved modeling of stationary spots on copper vacuum arc cathodes and on composite CuCr cathodes with large grains. *IEEE Transact. on Plasma Sci.*, **41**(8), 1950–1958.
26. Rao, L., Munz, R.J. (2008) Effect of cathode microstructure on arc velocity and erosion rate of cold cathodes in magnetically rotated atmospheric pressure arcs. *J. of Thermal Spray Technol.*, **17**(4), 574–582.
27. Messerle, B.E., Ustimenko, A.B., Ushanov, B.Zh. et al. (2014) Formation of nanocarbon materials in arc plasmotrons. *Vestnik VSGUTU*, **2**, 13–20 [in Russian].

PROBLEMS AND THEIR SOLUTION AT APPLICATION OF HIGHER POWER STEAM-WATER PLASMATRONS

S.V. Petrov

Institute of Gas of the NAS of Ukraine

39 Dehtiarivska Str., 03113, Kyiv, Ukraine. E-mail: vizana.sp@gmail.com

Implementation of new technologies of multiton plasma chemistry requires development of reliable higher-power long-life plasmotrons. During plasmatron operation, the cathode undergoes the most intensive wear, the anode life being approximately two times longer. Ingenious designs of steam-water transferred-arc plasmotrons were developed with application of two types of cathode assemblies: tungsten (PLR-3P) and copper tubular one (PLR-4P). In the latter the low level of tubular cathode erosion is ensured by distribution of the heat flow from the arc support point to a large area as a result of its fast movement (~ 100 m/s) due to gas-dynamic and magnetic forces that act on the arc radial region. Here, the arc spot scans the electrode working surface, while being between the aerodynamic and magnetic planes. At operation of PLR-4P plasmatron at 300 A current the cathode erosion was $9 \cdot 10^{-7}$ g/C for air, and for water steam it was $3 \cdot 10^{-7}$ g/C. More over, when water steam is used, the cathode surface remains clean and erosion level does not depend on operation time, whereas at operation in air the surface is covered by a black film of copper oxide (CuO). It is found that self-extinction of the electric arc can occur in the blind electrode, because of fluctuations of current and voltage and gas-dynamic instability of the vortex flow. In order to avoid self-extinction of the electric arc, 12-phase rectification circuits should be used for supplying power to steam-water plasmotrons of higher power (100...500 kW). Ref. 27, Fig. 6.

Key words: steam-water plasmatron; tubular cathode; erosion; magnetic vortex stabilization of arc; self-extinguishing of arc

Надійшла до редакції 25.03.2021

VI Міжнародна науково-технічна конференція

«SMART-ТЕХНОЛОГІЇ В ЕНЕРГЕТИЦІ ТА ЕЛЕКТРОНІЦІ – 2021»

15 – 21 серпня 2021 р. Комплекс «Маяк» КПІ ім. Ігоря Сікорського, смт. Лазурне, Херсонська обл.

Секції

- Електроенергетика та електротехніка
- Мікро- та наноелектроніка
- Електронні системи та мережі
- Біомедична та акустична електроніка
- SmartGrid та MicroGrid

<http://smart-ee.kpi.ua>, E-mail: confstee@gmail.com