

УДК 621.793.7

Пашенко В.М.\*

### **ПРОСТОРОВЕ УЗГОДЖЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ ТВЕРДОЇ ТА ГАЗОВОЇ ФАЗ ПРИ ПЛАЗМОВОМУ НАНЕСЕННІ ПОКРИТТЯ**

*Запропоновано нову схему організації двофазного плазмового потоку. Показані головні енергетичні параметри плазмотрона.*

Проблема узгодження просторового положення твердої та газової фаз при газотермічному нанесенні покриття тісно пов'язана із загальною проблемою підвищення техніко-економічної ефективності процесу нанесення покриття [1]. Раціональне розміщення дисперсного матеріалу в межах високотемпературної зони газового потоку (зокрема, в межах потоку низькотемпературної плазми при плазмовому нанесенні покриття) зменшує долю втрат порошку, знижує питомі енерговитрати на одиницю маси покриття, покращує умови нагрівання та прискорення всього ансамблю частинок. Це веде до підвищення коефіцієнту використання матеріалу, продуктивності процесу напилення і покращує фізико-механічні характеристики покриття та його функціональні властивості [2].

У відомих способах формування газопорошкового потоку при плазмовому нанесенні покриттів дисперсний матеріал вводиться у вже повністю або практично повністю сформований потік низькотемпературної плазми. Це може бути введення порошку за межами генератора плазми, або дисперсний матеріал подається в соплову частину дугового каналу В обох випадках матеріал вводиться під деяким кутом до напрямку витікання плазмового потоку.

При введенні порошку за межами дугового каналу виключається можливе його налипання на стінку дугового каналу, але об'єм високотемпературної зони газового потоку використовується нераціонально. Початкова траєкторія руху частинок не співпадає з траєкторією руху молекул газу, тому входження їх у високотемпературну область зміщується вниз по потоку. При цьому суттєво зменшується час перебування частинок в зоні нагрівання і перехід їх у розплавлений стан стає проблематичним, особливо для тугоплавких матеріалів з низькою теплопровідністю.

У другому випадку, місце подавання матеріалу зміщується вгору по потоку і порошок вводиться ще в межах дугового каналу, в його сопловій частині. Такий спосіб дає змогу збільшити час перебування матеріалу у високотемпературній зоні потоку плазми, але враховуючи різні початкові умови входження ансамблю частинок у плазмовий струмінь і певний діапазон їх характерного розміру, різко зростає ймовірність проходження частини порошків поперек дугового каналу і налипання їх на протилежну стінку із наступним перекриттям прохідного отвору. Особливо висока ймовірність налипання при введенні порошку в зону горіння електричної дуги, де наявні високий рівень температур і висока здатність газового середовища передавати тепло, хоча саме ця зона введення матеріалу є найбільш раціональною з точки зору технології плазмового напилення.

Метою наукової роботи є розробка конструкції плазмотрона, яка частково усуває цей недолік застосуванням „кутового сопла” [3]. Воно розміщується під деяким кутом до дугового каналу і практично є його продовженням. Дуга знаходиться на прямолінійній частині дугового каналу, а сопловий пристрій тільки змінює напрямок витікання вже сформованого плазмового потоку. При певному куті між дуговим каналом і сопловим пристроєм можна звести до мінімуму неспіввісність між каналом подавання дисперсного матеріалу і поздовжньою віссю соплового отвору. Однак, суттєвим недоліком способу є відхилення плазмового потоку на стадії розвиненої турбулентної течії, що викликає різке зростання теплових втрат у стінку

---

\*НТУУ "КПІ", канд. техн. наук, доц.

сопла в місці повороту струменя плазми. Це погіршує енергетичні параметри плазмотрона та значно скорочує ресурс роботи вихідного електрода.

Нові можливості керування енергетичними параметрами плазмового струменя, взаємним положенням окремих фаз газопорошкового потоку та місцем введення дисперсного матеріалу з'являються при застосуванні спеціальних методів зміни геометричних розмірів та конфігурації дугового каналу. Можливі два шляхи зміни форми та розмірів дугової камери – зміна у статичному стані (шляхом заміни вихідного електрода знеструмленого розпилювача) і зміна геометричних параметрів за заданою програмою у процесі роботи плазмотрона (у динаміці) [4].

Одним із прикладів практичної реалізації першого (“статичного”) підходу до керування взаємним положенням фаз газопорошкового потоку через зміну конфігурації дугового каналу є розробка розпилювача із зігнутим (криволінійним) дуговим каналом (рис. 1).

У запропонованій принциповій схемі плазмового розпилювача початкова та більша частина основної ділянки дуги розміщуються на вхідній, а менша частина основної ділянки дуги та її приелектродна ділянка – на вихідній ділянці дугового каналу, під кутом до початкової та основної ділянок дуги, а дисперсний матеріал вводиться в районі переходу вхідної ділянки дугового каналу у вихідну, співвісно з напрямком витікання плазмового потоку. Розміщення згину на початковій ділянці дугового каналу забезпечує низький рівень теплового потоку в стінку каналу, який визначається, в основному, передачею тепла випромінюванням. Крім того, відносно низький рівень і контрольованість втрат в стінку каналу забезпечується ізоляцією стінки каналу прошарком ще холодного закрученого газу, який використовується для просторової стабілізації дуги.

Все це дозволяє зберегти рівень втрат тепла в місці згину каналу в межах типових значень втрат для початкової ділянки прямого каналу розпилювача.

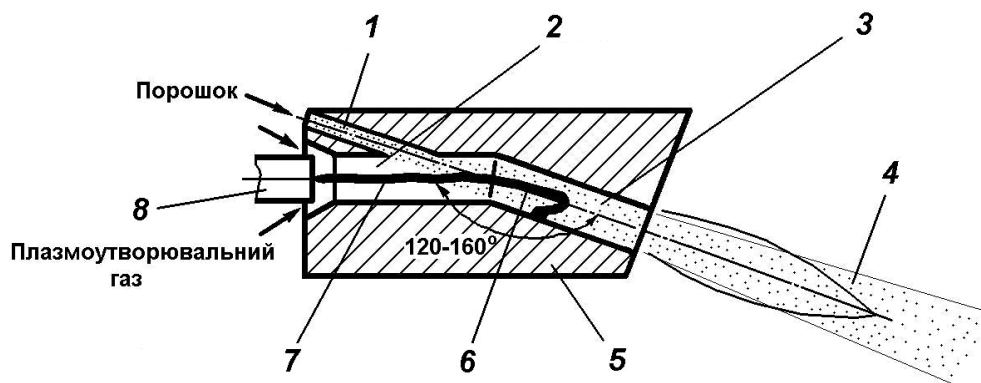


Рис. 1 – Принципова схема плазмотрона із криволінійним дуговим каналом: 1 – канал подавання матеріалу, який наповнюється; 2 – вхідна ділянка дугового каналу; 3 – вихідна ділянка дугового каналу; 4 – двофазний струмінь; 5 – вихідний електрод; 6 – кінцева ділянка стовпа дуги та приелектродна ділянка дуги; 7 – початкова ділянка та основна ділянка стовпа дуги; 8 – електрод розпилювача

Враховуючи очікування невисокого загального рівня теплових потоків в стінку вихідного електрода на ділянці до згину осі каналу, з'являється реальна можливість відійти від примусового водяного охолодження цієї ділянки і замінити його на примусове або, навіть, природне повітряне охолодження. Це конструктивно дозволяє здійснити подавання порошкового потоку під будь-яким кутом (в тому числі і нульовим) до осі газового потоку і досягнути просторового їх узгодження.

Порошок, який вводиться співвісно із напрямком витікання високотемпературного газу, не має радіальної складової швидкості (відносно поздовжньої осі дугового каналу). В результаті формується газопорошковий потік, в якому дисперсний матеріал починає нагріватися і прискорюватися ще до формування розвиненої турбулентної течії газового потоку, частково ще в області горіння електричної дуги. При цьому ймовірність перетинання

частинками порошку перерізу дугового каналу і налипання на стінці дугового каналу, внаслідок відсутності радіальної складової швидкості у частинок, різко знижується.

Запропонована схема формування газопорошкового потоку була реалізована на двоелектродному плазмовому розпилювачі лінійної схеми, що розрахований на використання в якості плазмотворювального газу повітря або газоповітряних сумішей. Діючий макет плазмотрона складався із катодного вузла від плазмотрона ВПР-11М для плазмово-повітряного різання та спеціально розробленого анодного вузла, в межах якого розміщений викривлений дуговий канал (рис. 2). Дуговий канал утворений із двох характерних ділянок, кожна із яких має індивідуальне охолодження: перша (вхідна ділянка) – частково посереднє водяне охолодження і природне повітряне охолодження, друга (вихідна ділянка) – примусове водяне пряме охолодження.

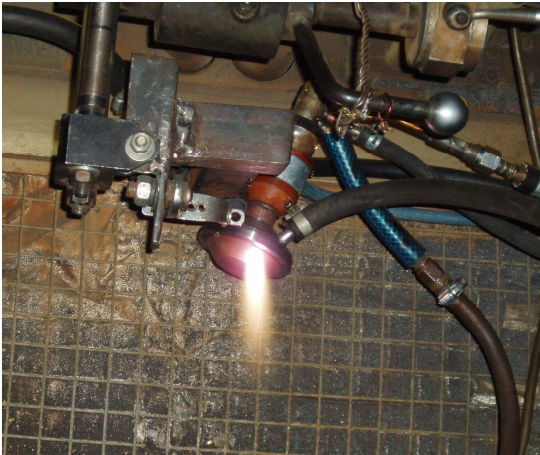


Рис. 2 – Плазмотрон із викривленим дуговим каналом



Рис. 3 – Вихідна частина дугового каналу

На діючому макеті досліджені основні енергетичні характеристики плазмотрона та його вольт-амперні характеристики.

Форма вольт-амперних характеристик пологоспадна і характерна для форми ВАХ двоелектродних плазмотронів цього класу (рис. 4).

Посередньо цей факт підтверджує перехід частини стовпа дуги та її приелектродної ділянки на вихідну ділянку дугового каналу (рис. 3), що створює умови для безперешкодного протікання процесів шунтування і скорочення дуги при зростанні струму. Діапазон стабільної роботи розпилювача, за умови розміщення дуги на обох ділянках дугового каналу, визначається витратою плазмотворювального газу та струмом дуги і для дослідженої конструкції лежить у межах 100...250 А при тиску плазмотворювального газу 0,22...0,4 МПа. При зниженні тиску газу нижче зазначеного діапазону і підвищенні струму дуги вище 250 А спостерігається втягнення всієї дуги у початкову ділянку дугового каналу і перехід плазмотрона на режим роботи із самовстановлювальною дугою.

Енергетичні характеристики плазмотрона визначались шляхом калориметричних вимірювань теплових потоків у вузлі конструкції розпилювача. На рис. 5 показана залежність втрат від струму дуги та тиску плазмотворювального газу.

Встановлено, що втрати в катодний вузол зростають у міру зростання струму дуги при постійній витраті плазмотворювального газу і зменшуються при підвищенні витрати повітря, що можна пояснити відведенням частини тепла газом, який обдуває зовнішню поверхню катодотримача. При цьому енергія не втрачається, а використовується на попереднє підігрівання плазмотворювального газу.

Втрати у вхідну частину дугового каналу практично визначаються втратами тепла через випромінювання дуги, тому зменшуються із зниженням струму і підвищенням витрати плазмотворювального газу внаслідок зниження середньомасової температури плазми. Втрати у вихідну частину анодного каналу носять такий же характер, як і втрати в катод.

За результатами вимірювань теплових потоків в елементи конструкції розпилювача розрахований коефіцієнт корисної дії генератора плазми в умовах роботи при змінних

режимних параметрах. Він, як видно із залежності (рис. 6), достатньо високий у діапазоні вимірювання і сягає 0,83 при мінімальному в межах діапазону вимірювання струмі та максимальній витраті плазмоутворювального газу, що значно перевищує характерні значення ККД серійних конструкцій. Хоча, слід зазначити, що наявність у вихідному електроді ділянки з природнім охолодженням, ефективність якого не враховується в розрахунках, дає дещо завищені значення ККД.

Ділянка з природнім охолодження технічно необхідна для організації введення дисперсного матеріалу в дуговий канал розпилювача співвісно з його вихідною ділянкою.

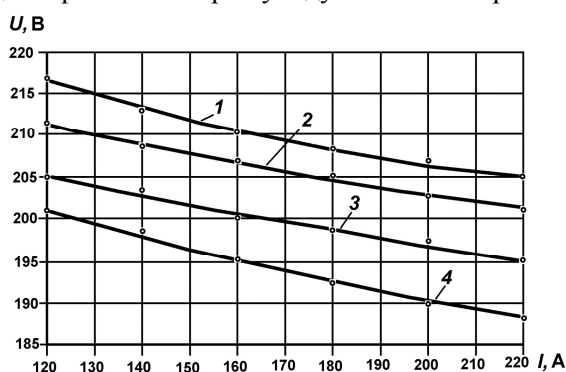


Рис. 4 – Вольт-амперні характеристики плазмотрона із викривленим дуговим каналом: 1 – тиск плазмоутворювального газу на вході в дуговий канал 0,4 МПа; 2 –  $p = 0,35$  МПа; 3 –  $p = 0,3$  МПа; 4 –  $p = 0,25$  МПа

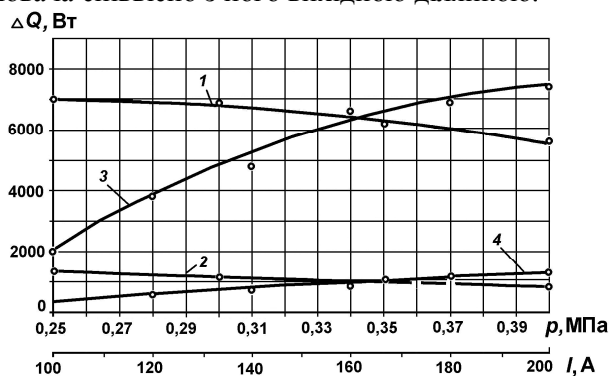


Рис. 5 – Залежність теплових втрат в катодний та анодний вузли розпилювача від струму дуги та тиску плазмоутворювального газу: 1 – втрати в анодний вузол при зміні тиску (струм дуги  $I = 180$  А); 2 – втрати в катодний вузол при зміні тиску ( $I = 180$  А); 3 – втрати в анодний вузол при зміні струму дуги ( $p = 0,3$  МПа); 4 – втрати в катодний вузол при зміні струму дуги ( $p = 0,3$  МПа)

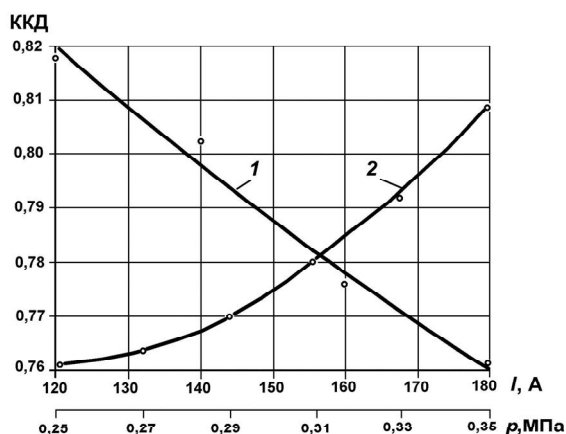


Рис. 6 – Залежність ККД від режимних параметрів роботи розпилювача

Технологічні можливості розпилювача перевірялись напильованням порошку  $Al_2O_3$  марки Г-0, ГОСТ 6912-74 із виділеною фракцією 25...50 мкм на зразки із Ст. 3 розміром  $150 \times 150$  мм. Визначався коефіцієнт використання матеріалу, як співвідношення маси матеріалу покриття на зразку до загальної маси використаного порошку.

Встановлено, що за рахунок подовження часу перебування дисперсного матеріалу в активній зоні плазмового струменя і покращання умов теплообміну з високотемпературним газом суттєво підвищується коефіцієнт використання матеріалу. Він сягав значень 0,63...0,68 порівняно із 0,25...0,3, досягнутими під час

напильовання цього ж матеріалу в ідентичних умовах на плазмотроні із прямим каналом.

В процесі експериментів за період досліджень випадків налипання дисперсного матеріалу на стінку дугового каналу зафіксовано не було.

За результатами попереднього вимірювання маси вихідного електрода, хронометрування його роботи в процесі випробувань і вимірювання маси його після завершення досліджень (із попереднім очищенням зовнішніх поверхонь від накипу) була зроблена спроба попередньо оцінити ерозійні характеристики вихідного електрода. Встановлено, що швидкість ерозії вихідного електрода лежить в межах типових значень для активних плазмоутворювальних

середовищ (повітря) і становить в дослідженому діапазоні струмів  $4...5 \cdot 10^{-10}$  кг/Кл, що дозволяє прогнозувати ресурс роботи вихідного електрода в межах 40...50 годин (до прийнятного з технологічних міркувань ступеня руйнування вихідного електрода).

Ефективне використання запропонованої схеми плазмового розпилювача в процесах плазмового наплення та поверхневої обробки матеріалів потребує більш детального і тривалого дослідження ресурсних характеристик плазмотрона, визначення раціональних умов функціонування окремих ділянок дугового каналу і вдосконалення на основі отриманої інформації системи охолодження елементів конструкції.

#### *Висновки*

1. Застосування вихідного електрода плазмового розпилювача із зігнутим дуговим каналом на відміну від використання кутового сопла не призводить до значного зростання втрат в елементи конструкції плазмотрона, що пояснюється тепловою ізоляцією стінок дугового каналу потоком ще холодного плазмоутворювального газу в місці повертання потоку.
2. Фіксування анодної плями на обмеженій ділянці після зміни напрямку газового потоку сприяє стабілізації параметрів електричної дуги і підвищенню стабільності процесу генерування плазмового струменя, що забезпечує в подальшому сталість параметрів процесу нанесення покриття.
3. Рівень втрат в елементи конструкції плазмотрона (у досліджених межах потужності 18...36 кВт) дозволяє застосувати природне охолодження вхідної ділянки дугового каналу (ділянки до його згину).
4. Раціональне використання об'єму високотемпературної зони плазмового струменя і узгодження напрямків руху твердої та газової фаз на стадії формування газопорошкового потоку сприяє суттєвому підвищенню показників ефективності процесу нанесення покриття і, зокрема, коефіцієнта використання матеріалу.

#### *Перелік посилань*

1. *Пащенко В.М.* Підвищення ефективності процесу повітряно-плазмового нанесення покриттів магнітним керуванням газопорошковим потоком / *В.М. Пащенко, С.П. Солодкий* // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2006. – № 3. – С. 71 – 75.
2. *Пащенко В.М.* Проблеми ефективності захисних покриттів у інженерії поверхні машин та обладнання / *В.М. Пащенко, В.Д. Кузнєцов, С.П. Солодкий* // Вестник національного технічного університету України „КПІ”. Машиностроение. – 2006. – № 49. – С. 178 – 186.
3. *Пащенко В.М.* Обладнання для газотермічного нанесення покриттів: Навч. посібник / *В.М. Пащенко.* – К.: ІВЦ «Політехніка», 2001. – 416 с.
4. *Пащенко В.М.* Проблеми керування енергетичними процесами обробки дисперсного матеріалу при плазмовому нанесенні покриття / *В.М. Пащенко, В.Д. Кузнєцов* // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2006. – № 2 (4). – С. 6 – 12.

Рецензент: О.Д. Размишляев  
д-р. техн. наук, проф., ПДТУ

Стаття надійшла 18.03.2008