

<http://dx.doi.org/10.15589/jnn20140409>

УДК 621.793.74

П 22

SIMULATION OF FLOWS OF AIR-GAS PLASMA OF PLASMATRONS OF INDIRECT ACTION

МОДЕЛЮВАННЯ ПОТОКІВ ГАЗОПОВІТРЯНОЇ ПЛАЗМИ ПЛАЗМОТРОНІВ НЕПРЯМОЇ ДІЇ

Valerii M. Paschenko

vn.paschenko@ukr.net

ORCID: 0000-0003-3742-6913

В. М. Пашенко,

канд. техн. наук, доц.

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ

Abstract. The effectiveness of the use of technologies for the plasma processing of materials is determined by the parameters of the plasma medium, the modeling of which can significantly reduce the experimental studies. The aim of the article is to create a model of the air-gas plasma with regard to the influence of the hydrocarbon component in the mixture. The article suggests a physical model for the generation and distribution of the main components in the arc plasma torch channel which takes mathematical modeling as a basis. To describe the thermal and gas-dynamic processes in the plasma torch a simplified system of magnetogasdynamics equations was used. These equations were fixed in the boundary layer approximation, specifying the subsequent stages. The use of the results of experimental studies of the temperature conditions of the electrodes in the model, the electric field stress distribution and the energy characteristics of the plasma torch design helps to improve the accuracy of the modeling. The proposed model can be used for qualitative and quantitative evaluation of the main characteristics of arc plasma torches and plasma flows.

Keywords: plasma torch; plasma flow; mathematical modeling; mixture of air with hydrocarbon gas; distribution parameters of the jet.

Анотація. Базуючись на результатах досліджень плазмотронів, що працюють на сумішах повітря з вуглеводнями, запропоновано фізичну модель процесу генерування газоповітряної плазми. На основі цієї моделі проведено моделювання процесу генерації плазми та отримано просторовий розподіл енергетичних параметрів потоку. Наведено попередні результати розрахунків. Запропоновано шляхи вдосконалення моделі.

Ключові слова: плазмотрон, плазмовий потік, математичне моделювання, суміш повітря з вуглеводневими газами, розподіл параметрів струменя.

Аннотация. На основе результатов исследований плазмотронов, работающих на смесях воздуха и углеводородных газов, предложена физическая модель процесса генерирования газозвушной плазмы. На основе этой модели проведено моделирование процесса генерации плазмы и получено пространственное распределение энергетических параметров потока. Приведены предварительные результаты расчетов. Предложены пути совершенствования модели.

Ключевые слова: плазмотрон, плазменный поток, математическое моделирование, смесь воздуха с углеводородными газами, распределение параметров струи.

REFERENCES

- [1] Bykhovskiy D.G. *Plazmennaya rezka* [Plasma cutting]. Leningrad, Mashinostroenie, 1972. 168 p.
- [2] *Osnovy rascheta plazmotronov lineynoy skhemy* [Basics of calculation of plasma torches of linear circuit] pod red. M. F. Zhukova. Novosibirsk, 1979. 148 p.
- [3] Paschenko V.M., Solodkyi S.P. Vplyv vuhlevodnevoho komponenta na enerhetychni kharakterystyky plazmovykh rozpyliuvachiv, shcho pratsuiut na sumishakh povitria z vuhlevodniamy [Influence of hydrocarbon component on the energy characteristics of plasma spraying jets, running on mixture of air with hydrocarbons]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu im. V. Dalia* [Bulletin of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University], 2003, no. 11, issue 69, pp. 64–68.
- [4] Paschenko V.M. *Heneruvannia potokiv plazmy ta keruvannia yikh enerhetychno-prostorovymy parametramy* [Generation of plasma flows and control of their energy and spatial parameters]. Kyiv, Gnozis Publ., 2014. 283 p.

- [5] Pashchenko V.M., Kharlamov M.Yu. Matematychno modeliuвання potokiv povitrianoi plazmy duhovykh plazmotroniv poserednoi dii [Mathematical simulation of air plasma flows in arc plasma torches of indirect action]. *Prohresyvni tekhnologii i systemy mashynobuduvannya – Advanced technologies and systems of machine engineering*, 2012, no, 1, 2, issue 43, pp. 244–253.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Одними з основних факторів, які впливають на ефективність застосування технологій плазмової обробки матеріалів і, зокрема, нанесення плазмових покриттів, є параметри плазмового середовища, в якому здійснюється обробка матеріалу. Практично оптимальну сукупність енергетичних, теплофізичних та концентраційних показників демонструє плазма сумішшю повітря з вуглеводневими газами, яка є представником середньоентальпійних плазмових середовищ [4]. Доступність і дешевизна вихідних плазмоутворювальних компонентів разом зі значним рівнем середньомасових температур 5000...7000 К за умови характерних для інженерії поверхні енерговкладів 3...12 кВт·год/м³, можливість керування окиснювально-відновним потенціалом робочого середовища дозволяють достатньо ефективно застосовувати згадану плазму для обробки поверхонь виробів та плазмового напилення широкої номенклатури матеріалів [4].

Водночас досягнення високих значень коефіцієнта використання матеріалу та показників якості отриманого покриття або оброблених поверхонь, а також оптимізація траєкторій руху джерела нагрівання можливі лише за умови наявності вичерпної інформації щодо просторового розподілу основних параметрів газоповітряних плазмових струменів: температури, ентальпії, швидкості, окиснювально-відновного потенціалу активної зони середовища.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

На сьогодні основним джерелом інформації щодо характеристик плазмових потоків залишаються результати експериментальних досліджень реальних плазмових струменів. Ці дослідження були і залишаються тривалим, достатньо складним і витратним процесом [4]. Альтернативою йому може бути математичне моделювання потоків низькотемпературної плазми за розрахунковими схемами, максимально наближеними до реально існуючих і застосованих у процесах напилення та загартовування.

Експериментальні дослідження струменів газоповітряної плазми виявили високу чутливість енергетичних параметрів генератора плазми до вмісту вуглеводневого компонента у вихідній плазмоутворювальній суміші: у випадку незначного (частки відсотка об'ємного) вмісту метану у вихідній суміші різко підвищується напруга на дузі [3].

Аналогічні явища за інших обставин були зафіксовані у роботах [1, 2]. Наприклад, виявлено [2],

що у плазмотронів, які працюють на сумішах азоту з киснем, спад напруги на дузі не залежить від складу газу. Зниження вмісту азоту до 1...2 % не спричиняло помітного впливу на напругу на дузі. Після виходу на чисто кисневий режим напруга дугового розряду різко зменшувалася на 15 % порівняно з напругою повітряної дуги. Таким чином, поки в суміші міститься азот хоча б у кількості 1...2 %, дуга залишається «азотною». У згаданій роботі [2] запропоноване пояснення цього факту. Було припущено, що в потоці закрученого газу під дією відцентрових сил здійснюється сепарація газу за компонентами. За цих умов більш «важкий» кисень розміщується біля стінки дугової камери, а на осі залишається «легкий» азот, у середовищі якого і формується стовп електричної дуги.

Експериментальна перевірка можливості газодинамічного розподілу газової суміші за компонентами, що була проведена у випадку застосування суміші «повітря–природний газ», не підтвердила наявності сепарації компонентів вихідної суміші.

У роботі [1], під час дослідження технологій плазмового різання з використанням аргонових та аргоно-водневих сумішей, виявлений значний вплив водню на енергетичні характеристики дуги навіть за умови невисокого вмісту водневого компонента. Висловлене припущення, що це є результатом термодифузійного розподілу газів, що входять до складу плазмоутворювальної суміші. Компонент із меншою молекулярною вагою (водень) дифундує до осьової області дуги, а на периферії у пристінному шарі створюється надлишок більш важкого газу – аргону. Вважаємо, що ця гіпотеза більш ймовірна в умовах значних градієнтів температур і тисків за перерізом дугового каналу й значної різниці в атомарній вазі водню та аргону.

МЕТА РОБОТИ – розробка фізичної моделі генерування газоповітряної плазми, яка б урахувала аномальну залежність енергетичних параметрів генератора плазми від вмісту вуглеводневого компонента і розробка на її основі засобів моделювання потоків плазми.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Якщо взяти за основу наявність факту термодифузії в дуговому каналі за умови застосування газових сумішей системи N–C–O–H, можна вважати, що під час додавання вуглеводневого компонента дуга з «азотною» стає «водневою». При цьому проходить перебудова електропровідної області потоку газу.

Пропонуємо наступну фізичну модель процесу генерування газоповітряної плазми, яка може бути

використана під час математичного моделювання процесу (рис. 1).

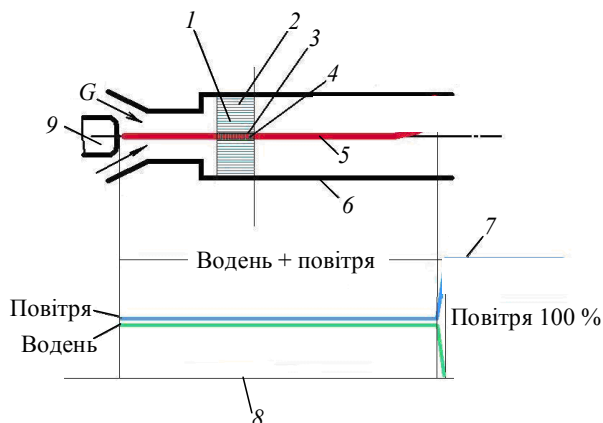


Рис. 1. Схема фізичної моделі розподілу основних компонентів вихідної плазмоутворювальної суміші в дуговому каналі плазмотрона: 1 – розподіл складу плазмоутворювального газу поперек дугового каналу; 2 – повітря 100%; 3 – перехідна зона; 4 – водень+повітря; 5 – дуга; 6 – анод; 7 – перехідна зона; 8 – розподіл складу плазмоутворювального газу вздовж осі дугового каналу; 9 – катод

У процесі дисоціації (за умови високих температур) вуглеводневого компонента плазмоутворювальної суміші утворюється вуглець та водень. Унаслідок термодифузії за наявності градієнта тисків у перерізі дугового каналу (результат вихідного закручування плазмоутворювального газу) легкі атоми водню переміщуються і накопичуються у центральній зоні дугового каналу в області розміщення дуги. За умови значного підвищення вмісту водню у зоні горіння дуги (умовно на першому етапі вважаємо, що там практично присутній тільки водень) суттєво змінюються умови її існування – дуга стає «водневою». Всю іншу частину простору дугового каналу займає практично чисте повітря. Між повітрям і воднем розміщена перехідна зона, в якій за певним законом здійснюється перехід від одного газу до іншого. Уздовж дугового каналу «водневе осердя» присутнє тільки за довжиною дуги, а потім за довільним законом переходить у повітря.

На рис. 2 наведена розрахункова схема, яка практично повністю відтворює експериментально досліджену конфігурацію дугового каналу плазмового розпилювача.

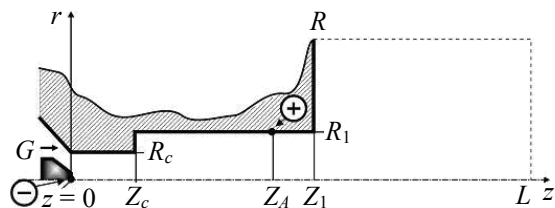


Рис. 2. Розрахункова схема математичної моделі

*Розрахунки виконані М. Ю. Харламовим (Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля).

У процесі моделювання припускається, що дуга постійного струму I розміщується між катодом ($z = 0$) та анодом плазмотрона і замикається на анод на деякій відстані Z_A від початкового перерізу, де струм дуги плавно спадає і далі (при $z > Z_A$) має місце інерційний рух безструмової плазми в каналі плазмотрона. Після перерізу Z_1 наявне витікання плазмового струменя у навколишнє середовище з тиском, що близький до атмосферного.

Для опису течії плазми за згаданих умов використані загальноприйняті припущення: плазмовій системі притаманна циліндрична симетрія, а процеси, що в ній проходять, вважаються стаціонарними; плазма знаходиться у стані локальної термодинамічної рівноваги, а власне випромінювання плазми є об'ємним; основним механізмом нагрівання плазми є джоулеве тепловиділення (роботою сил тиску і в'язкою дисипацією можна знехтувати), а перенос енергії у стовпі дуги здійснюється за рахунок теплопровідності і конвекції; течія плазми в'язка, дозвуква, режим течії турбулентний, аксіальна компонента швидкості плазми суттєво більша за радіальну; зовнішні магнітні поля відсутні; течія газу відбувається переважно в осьовому напрямку, а радіальні градієнти температури і швидкості значно більші за аксіальні.

Ураховуючи викладене, для опису теплових і газодинамічних процесів, які проходять у плазмотроні, можна застосувати спрощену систему магнітогазодинамічних (МГД) рівнянь, записаних у наближенні прилежого шару [5].

У випадку використання як плазмоутворювальної суміші повітря з вуглеводнями у математичну модель, що була застосована у роботі [5], вносяться деякі зміни. Зокрема, додається параметр, який відповідає локальному значенню відносної концентрації повітря в одиниці об'єму газового середовища, а також задається закон, за яким буде змінюватися склад плазмоутворювального газу за перерізом та вздовж осі каналу.

Попередні розрахунки були зроблені виходячи з припущення, що центральна струмоведуча область дугового каналу заповнена на 100 % воднем, який у межах перехідної зони замінюється повітрям. Результати розрахунку достатньо суттєво відрізнялися від експериментальних даних, що були отримані за умови ідентичних режимних параметрів.

Наступними етапами вдосконалення моделі було варіювання співвідношенням повітря та водню в області горіння електричної дуги; уточнення температур стінки дугового каналу та навколишнього середовища; уточнення початкових умов на катоді.

На рис. 3 і 4 наведено результати порівняльного розрахунку температурних та швидкісних полів струменів повітряної та газоповітряної плазми*.

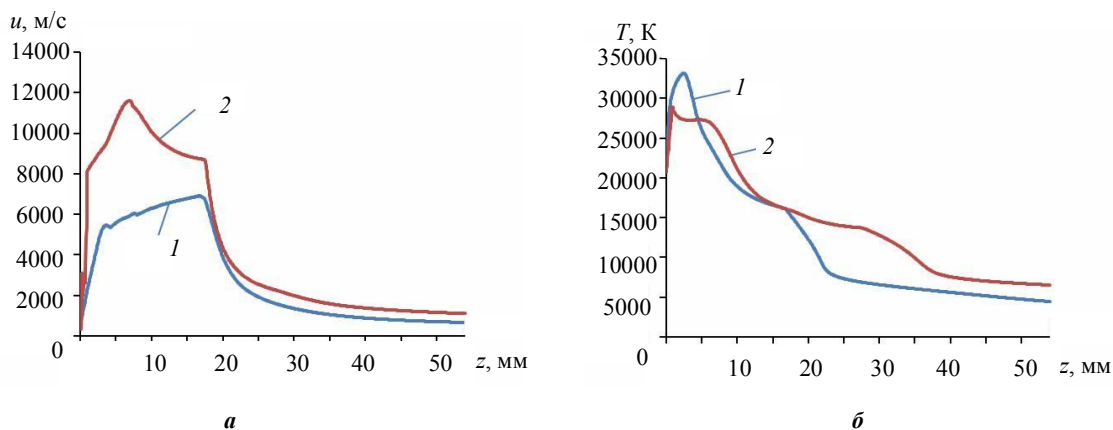


Рис. 3. Розподіл осевих значень швидкості (а) та температури (б) плазми у дуговому каналі плазмотрона: 1 – повітря; 2 – 50 % H_2 + 50 % повітря (у дуговій області)

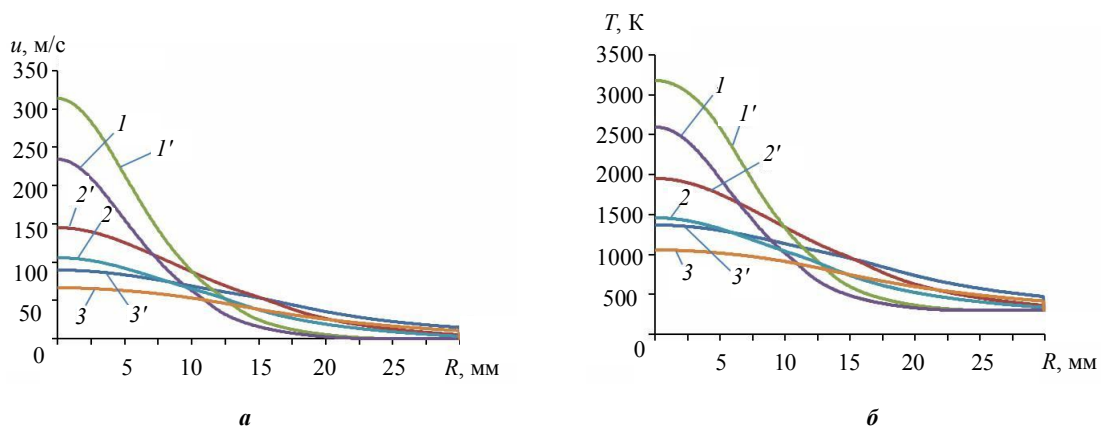


Рис. 4. Радіальні розподіли швидкості (а) та температури (б) плазми у відкритій області (за зрізом сопла): 1, 1' – 50 мм; 2, 2' – 100 мм; 3, 3' – 150 мм від зрізу сопла; (1–3) – повітря; (1'–3') – 50 % H_2 + 50 % повітря (у дуговій області)

Установлено, що у межах дугового каналу наявна суттєва відмінність у значеннях швидкості плазми на осі дугового каналу (див. рис. 3,а), яка потім нівелюється у міру розвитку течії потоку (координата z відраховується від торцевої поверхні катода).

Температурна відмінність, навпаки, розвивається у міру формування плазмового потоку і є фактором, який визначає наступні більш високі параметри робочого тіла у процесах нанесення покриттів (див. рис. 3,б).

На рис. 4 наведено приклад розрахунку радіального розподілу швидкості та температури плазми на кількох дистанціях від зрізу сопла генератора плазми.

Відповідно до розрахунків струмів газоповітряної плазми відрізняється від повітряної значно більшими розмірами активної зони, що є фактором, який забезпечує ефективне нагрівання всієї сукупності частинок дисперсного матеріалу в процесі його обробки.

ВИСНОВКИ

1. Запропонована математична модель може бути використана для якісної та кількісної оцінок

основних характеристик дугових плазмотронів та потоків плазми, що генеруються ними, а результати порівняльного аналізу температурних і швидкісних характеристик потоку високотемпературного газу за межами конструкції генератора плазми як інструмент оптимізації геометричних та режимних параметрів самого плазмотрона – за умови використання як параметрів оптимізації числових показників характеру просторового розподілу згаданих енергетичних характеристик плазмового струменя.

2. Адекватність результатів моделювання суттєво залежить від просторової орієнтації в межах дугового каналу вихідного потоку газу. Точність розрахунків підвищується зі збільшенням співвідношення аксіальної та тангенціальної складових швидкості.

3. Підвищенню точності моделювання сприяє насичення моделі результатами експериментального дослідження температурних умов роботи електродів, розподілу напруженості електричного поля та енергетичних характеристик досліджуваних конструкцій плазмотронів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] **Быховский, Д. Г.** Плазменная резка [Текст] : монография / Д. Г. Быховский. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1972. – 168 с.
- [2] Основы расчета плазмотронов линейной схемы [Текст] : монография / под ред. М. Ф. Жукова. – Новосибирск : АН СССР, Сибирское отд-ние, Институт теплофизики, 1979. – 148 с.
- [3] **Пашенко, В. М.** Вплив вуглеводневого компонента на енергетичні характеристики плазмових розпилювачів, що працюють на сумішах повітря з вуглеводнями [Текст] / В. М. Пашенко, С. П. Солодкий // Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля. – Луганськ, 2003. – № 11 (69). – С. 64–68.
- [4] **Пашенко, В. М.** Генерування потоків плазми та керування їх енергетично-просторовими параметрами [Текст] : монографія / В. М. Пашенко. – К. : Гнозис, 2014. – 283 с.
- [5] **Пашенко, В. М.** Математичне моделювання потоків повітряної плазми дугових плазмотронів посередньої дії [Текст] / В. М. Пашенко, М. Ю. Харламов // Прогресивні технології і системи машинобудування : міжнар. зб. наук. праць. – Донецьк : ДВНЗ «Донецьк. нац. техн. ун-т», 2012. – Вип. 1, 2 (43). – С. 244–253.

© В. М. Пашенко

Надійшла до редколегії 08.05.2014

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *О. М. Дубовий*