

**КРИТЕРІАЛЬНА ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ГЕНЕРАТОРІВ ПЛАЗМИ
ДЛЯ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ**

Проаналізована можливість встановлення універсального показника енергетичної ефективності генераторів плазми посередньої дії, які застосовуються в технологіях інженерії поверхні. Запропоноване і обґрунтоване використання безрозмірних параметрів, що характеризують повноту перетворення вхідних потоків енергії у енергію плазмового струменя: коефіцієнта корисної дії; діапазону зміни питомої ентальпії плазмового струменя; критерію, що враховує форму вольт-амперної характеристики плазмотрона. Показано, що запропонований комплексний критерій енергетичної ефективності генератора плазми може бути використаний не тільки для порівняльної оцінки різних конструкцій плазмових пристроїв, але і для оптимізації існуючих. [dx.doi.org/10.29010/084.8]

Ключевые слова: плазмові генератори; коефіцієнт корисної дії; питома ентальпія; вольт-амперні характеристики плазмотронів; енергетична ефективність плазмового генератора.

Вступ

Низькотемпературна дугова плазма достатньо давно і широко застосовується в сучасному машинобудуванні, плазмохімії, металургії та ремонтному виробництві. Технології плазмової обробки складають основу інженерії поверхні – перспективного напрямку науково-технічного прогресу. В останні роки здобули потужний розвиток генеративні технології – технології, які базуються на принципі виготовлення виробів пошаровим нарощуванням об'єктів до досягнення потрібних їх характеристик на нано-, мікро- і макрорівнях із формуванням фізичної поверхні. Пошарове вирощування твердих тіл на макрорівні, перехід від віртуального простору і віртуальних моделей до твердотільних об'єктів незалежно від ступеня складності їх конструкції, форми і розмірів здійснюється із використанням цілого ряду технологій, у тому числі плазмових.

Ефективне застосування низькотемпературної плазми у процесах обробки матеріалів можливе за умови створення надійних та економічних конструкцій генераторів плазми, здатних працювати в широкому діапазоні зміни режимних параметрів.

На сьогодні створено і застосовується значна кількість плазмових пристроїв різної потужності. Вони відрізняються продуктивністю, надійністю, діапазоном зміни енергетичних характеристик тощо. Вибір оптимальної для конкретного технологічного процесу конструкції здійснюється, зазвичай, за одним, критичним на думку експерта, пара-

метром. Такий вибір часто носить суб'єктивний характер і не завжди є раціональним.

Постановка задачі

Метою роботи є розробка універсального критерію оцінки енергетичної ефективності технологічних плазмових генераторів посередньої дії, який не залежить від потужності та продуктивності пристроїв, що порівнюються, і який дозволить перевести процес вибору із категорії якісного аналізу у кількісний.

Основна частина

Генератор плазми є основним компонентом установки для обробки матеріалів та поверхонь і саме він, як правило, визначає техніко-економічні показники всього комплексу обладнання. Генератор плазми (плазмотрон) є перетворювачем одного виду (або кількох видів) енергії у теплову енергію робочого тіла і призначений для створення стабільно відтворюваних протягом певного часу потоків низькотемпературної плазми з відомими температурою, швидкістю та розподілом параметрів у просторі.

До технологічних дугових плазмотронів висуваються загальні та специфічні (для кожного технологічного процесу) вимоги:

- високий ККД;
- здатність формувати компактний високотемпературний газовий потік, що може забезпечити ефективне нагрівання до необхідної температури

ри матеріалу, що обробляється. При плазмовому нанесенні покриттів додається здатність прискорювати частинки матеріалу до визначеної швидкості;

- здатність забезпечувати стабільність параметрів потоку плазми за температурою, швидкістю та складом, а також потрібний профіль цих параметрів за перерізом вздовж та поперек потоку;
- можливість зміни (у певних межах) абсолютно значення потужності конкретного зразка;
- здатність до зміни питомої енергії високотемпературного робочого тіла залежно від вимог технологічного процесу;
- здатність змінювати у процесі роботи окиснювально-відновний потенціал плазмового середовища;
- високий ресурс роботи;
- простота конструктивного виконання, яка забезпечує якісний ремонт в умовах виробництва;
- технологічність при масовому виготовленні;
- мінімальні масо-габаритні показники;
- раціональне використання кольорових матеріалів;
- естетичний вигляд та ергономічна доцільність.

Основним показником ефективності застосування генераторів плазми є продуктивність технологічних процесів, реалізованих за їх допомоги. Але враховуючи, що продуктивність технологічних процесів інженерії поверхні зазвичай пропорційна потужності використаного генератора плазми, практично важко порівнювати за цим показником плазмотрони різної потужності. Доцільніше аналізувати питомі енергетичні показники, які демонструють вибрані для порівняння зразки, а також безрозмірні характеристики процесу перетворення енергії.

Першим за значимістю показником енергетичної ефективності плазмового генератора є його ККД. Він характеризує повноту перетворення енергії і не є сталою величиною, а залежить від режимних параметрів генерації плазми. Значення ККД сучасних технологічних генераторів плазми коливається в широких межах: від 0,5 до 0,9. Наприклад, характерні значення ККД плазмотронів для нанесення покриттів, які працюють на сумішах повітря із вуглеводневими газами, лежать в діапазоні (0,7...0,85) [1].

Одним із варіантів урахування ККД у ході оцінки енергетичної ефективності дугових плазмотронів може бути застосування осередненого за діапазоном зміни робочого струму значення ККД:

$$\bar{\eta} = \frac{1}{I_{\max} - I_{\min}} \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} f(I) dI,$$

де I_{\max} та I_{\min} – відповідно максимальне та мінімальне значення робочого струму; $\eta = f(I)dI$ – функція залежності ККД від струму (за умови сталої витрати плазموутворювального газу та незмінного спів-

відношення між компонентами плазмоутворювальної суміші).

Іншим варіантом визначення середнього значення ККД може бути його розрахунок як середнього арифметичного мінімального і максимального значень, отриманих при зміні всіх можливих режимних параметрів генерації плазми.

Ще одним, не менш важливим енергетичним параметром технологічних плазмотронів, є значення питомої ентальпії плазмового струменя. Саме цей показник характеризує потенційну можливість плазмового струменя нагрівати за визначений час матеріал до потрібної температури. На практиці питома ентальпії визначається кількістю енергії, вкладеної в одиницю об'єму газу за одиницю часу [2]. Для плазмового нанесення покриттів, наприклад, значення питомої ентальпії визначає тип матеріалу, який може бути оброблений за допомогою конкретного робочого тіла. Матеріали із відносно низькою температурою плавлення (метали, сплави, пластмаси тощо) можуть утворювати покриття при значеннях питомої ентальпії (3...7) кВт·год./м³. Для нанесення тугоплавких покриттів, наприклад, із кераміки необхідно підвищувати питому ентальпії до значень (8...12) кВт·год./м³. Здатність плазмового генератора через зміну режимних параметрів генерації плазми змінювати значення питомої ентальпії плазмового струменя є необхідною умовою його універсальності як інструмента для обробки матеріалів. За цим показником особливе місце займають плазмові генератори на сумішах повітря із вуглеводневими газами. За рахунок подавання на вхід плазмотрона двох видів енергії (електричної енергії та енергії горючого газу), з'являється додатковий канал впливу на загальну потужність генератора плазми без погіршення його загального ККД [3].

Діапазон зміни питомої ентальпії плазмового струменя (на зрізі сопла) визначається відношенням максимально досяжного значення питомої ентальпії до його мінімального значення:

$$\frac{\epsilon_{\max}}{\epsilon_{\min}}.$$

Визначення граничних значень питомої ентальпії можливе при зміні струму дуги за умови сталої витрати плазмоутворювального газу та незмінного співвідношення між компонентами плазмоутворювальної суміші (по аналогії із визначенням осередненого за діапазоном зміни робочого струму значення ККД). Іншим варіантом є розрахунок значень мінімальної та максимальної питомої ентальпії за умови мінімального струму та максимальної витрати плазмоутворювального газу і максимального струму та мінімальної витрати газу, відповідно.

Плазмовий генератор є невід'ємним елементом системи «джерело живлення-плазмотрон». Стабільність роботи плазмотрона значною мірою залежить

від узгодження вольт-амперних характеристик (ВАХ) плазмотрона і джерела живлення. До того ж, узгодження параметрів згаданої системи дозволяє більш ефективно використовувати встановлену потужність джерела живлення і може дозволити знизити його вартість за рахунок спрощення конструкції.

Як відомо, форма вольт-амперної характеристики плазмового генератора залежить від його принципової схеми і може бути спадною, нейтральною або висхідною [4]. Застосування плазмових генераторів зі спадною характеристикою потребує використання джерел живлення із різко спадною (вертикальною) ВАХ – «джерел струму». Формування характеристики такого виду забезпечується за рахунок значного ускладнення схеми керування джерелом живлення [5]. Плазмові генератори із висхідною характеристикою не висувають жорстких вимог до форми ВАХ джерела живлення і, в окремих випадках, дозволяють працювати із «джерелами напруги», тобто джерелами живлення із жорсткою горизонтальною ВАХ [4].

Крім того, застосування генераторів плазми із висхідною ВАХ підвищує ефективність керування загальною потужністю плазмотрона шляхом зміни струму дуги. Це, у свою чергу, підвищує діапазон можливої зміни питомої ентальпії струменя плазми.

Форма ВАХ, як критерій для порівняльної оцінки енергетичної ефективності генераторів плазми, може бути врахована у вигляді співвідношення значень напруги на дузі у крайніх точках діапазону робочих струмів плазмотрона:

$$\frac{U_{I_{\max}}}{U_{I_{\min}}},$$

де $U_{I_{\max}}$ – значення напруги на дузі при максимально допустимому струмі дуги; $U_{I_{\min}}$ – значення напруги на дузі при мінімально допустимому струмі дуги.

Таким чином, для порівняльної оцінки енергетичної ефективності технологічних плазмотронів посередньої дії пропонується використовувати безрозмірний критерій, який є добутком трьох безрозмірних параметрів:

$$\beta = \bar{\eta} \cdot \frac{\epsilon_{\max}}{\epsilon_{\min}} \cdot \frac{U_{I_{\max}}}{U_{I_{\min}}}.$$

Енергетично більш ефективним для обробки матеріалів можна вважати той генератор плазми, для якого розраховане значення β є найбільшим. Значення β зростає у разі підвищення ККД, розширення діапазону можливої зміни питомої ентальпії плазми та формування висхідних вольт-амперних характеристик. Порівняння конструкцій, у випадку різних за потужністю і конструктивним особливос-

тями плазмотронів, доцільно здійснювати для номінальних витрат плазмоутворювального газу і рекомендованого у кожному конкретному випадку складу плазмоутворювальної суміші.

Критерій β може бути використаний як параметр оптимізації у ході створення нових конструкцій генераторів плазми.

Наприклад, згаданий критерій був використаний для оптимізації геометричних розмірів дугового каналу плазмотрона ПГ-1. Плазмотрон ПГ-1 є двоелектродним генератором плазми із автогазодинамічною стабілізацією довжини дуги [6]. В якості плазмоутворювального газу в ньому застосовується суміш повітря із вуглеводневими газами із можливістю зміни співвідношення між компонентами від чистого повітря до «багатих» сумішей із відновним потенціалом. Дуговий канал є профільованим, із вхідною частиною меншого діаметра d_b і вихідною (сопловою) d_c – більшого.

У ході визначення критерію β була встановлена його суттєва залежність від витрати плазмоутворювальної газової суміші та співвідношення між її компонентами. Для виключення цієї залежності застосовувався приведений критерій β^* , який є результатом коригування β через урахування реальної витрати та складу плазмоутворювальної суміші.

На рис.1 наведені деякі результати розрахунків.

Згідно з наведеними залежностями, збільшення вихідного діаметра дугового каналу d_c (у досліджених межах) підвищує приведений критерій ефективності. Одночасно β^* зростає із наближенням d_b/d_c до значень (0,45...0,5), що узгоджується із гідродинамічними уявленнями щодо дії уступу в дуговому каналі як джерела турбулентності газового потоку і фактора, який сприяє фіксації місця прив'язування дуги.

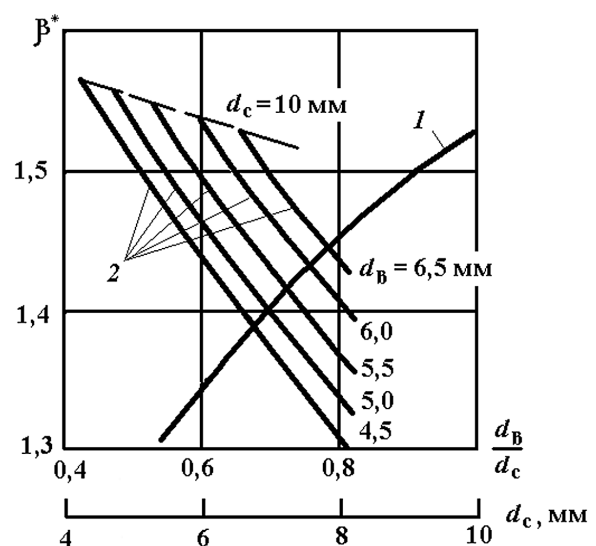


Рис. 1. Залежність приведенного критерію ефективності β^* від співвідношення діаметрів дугового каналу d_b/d_c та діаметра соплової частини каналу d_c

Висновки

1. Критерій оцінки енергетичної ефективності технологічних плазмотронів посередньої дії дозволяє проводити кількісну оцінку альтернативних варіантів плазмових пристроїв із вибором найбільш досконалих.

2. Згаданий критерій може бути використаний як параметр оптимізації при розробці нових генераторів плазми і модернізації існуючих.

3. Запропонований критерій енергетичної ефективності має значний потенціал вдосконалення за рахунок введення нових компонентів, які враховують додаткові фактори, що можуть впливати на функціональні можливості плазмового генератора.

Література

[1] Петров С. В. Плазменное газозвдушеное напыление [Текст] моногр. / С. В. Петров, И. Н. Карп. – К.: Наук. думка, 1993. – 494 с.

[2] Пащенко В. М. Генерування потоків плазми та керування їх енергетично-просторовими параметрами [Текст]: моногр. / В. М. Пащенко. – Київ: Гнозис, 2014. – 283 с.

[3] Pashchenko V. Research into the energy conversion processes in hybrid plasma devices for applying the coatings / V. Pashchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies – 2017. – # 2 (86). – P. 47-54.

[4] Даутов Г. Ю. Плазмотроны со стабилизированными электрическими дугами [Текст]: моногр. / Г. Ю. Даутов, В. Л. Дзюба, И. Н. Карп. – К.: Наук. думка, 1984. – 168 с.

[5] Пащенко В. М. Обладнання для газотермічного нанесення покриття [Текст]: навч. посіб. / В. М. Пащенко. – К.: ІВЦ “Політехніка”, 2001. – 416 с.

[6] Пащенко В. М. Дугові генератори в технологіях інженерії поверхні [Текст]: моногр. / В. М. Пащенко. – Харків: Мачулін, 2018. – 288 с.

Pashchenko V. M.

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». Ukraine, Kyiv

**CRITERIAL ESTIMATION OF ENERGY EFFICIENCY
OF PLASMA GENERATORS FOR MATERIAL PROCESSING**

The possibility of setting a universal indicator of the energy efficiency of indirect plasma generators, which are used in technologies of surface engineering, was analyzed. Using of dimensionless parameters that characterize the completeness of transformation of input flows of energy into plasma jet energy were proposed and justified. These parameters are the coefficient of efficiency; the range of changes in the specific enthalpy of plasma jet; a criterion that considers the shape of the volt-ampere characteristic of the plasmatrone. It was shown that the proposed comprehensive criterion of energy efficiency of the plasma generator can be used not only for comparative evaluation of different structures of plasma devices, but also for optimization existing ones. [dx.doi.org/10.29010/084.8]

Keywords: plasma generators; the coefficient of efficiency; specific enthalpy; the volt-ampere characteristics of the plasmatrone; the energy efficiency of the plasma generator.

References

- [1] Petrov S. V. Plazmennoe gazovozdushnoe napylenie [Tekst]: monogr. / S. V. Petrov, I. N. Karp. – K.: Nauk. dumka, 1993. – 494 p.
- [2] Pashchenko V. M. Generuvannya potokiv plazmi ta keruvannya ikh energetichno-prostorovimi parametrami [Tekst]: monogr./ V. M. Pashchenko.– K: Gnozis, 2014. – 283. p.
- [3] Pashchenko V. Research into the energy conversion processes in hybrid plasma devices for applying the coatings / V. Pashchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies – 2017. – # 2 (86). – P. 47-54.
- [4] Dautov G. Yu. Plazmotrony so stabilizirovannymi elektricheskimi dugami [Tekst]: monogr. / G. Yu. Dautov, V. L. Dzyuba, I. N. Karp. – K.: Nauk. dumka, 1984. – 168 p.

- [5] Pashchenko V. M. Obladnannya dlya gazotermichnogo nanesennya pokrittya [Tekst]: navch.posib. / V. M. Pashchenko. – K.: IVC “Politekhnik”, 2001. – 416 p.
- [6] Pashchenko V. M. Dugovi generatori v tekhnologiyakh inzheneriji poverkhni [Tekst]: monogr. / V. M. Pashchenko. – Kharkiv: Machulin, 2018. – 288 p.