

# ПЛАЗМОТРОН ДЛЯ ПЛАЗМОВО-ПОРОШКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ З ДВОМА СИСТЕМАМИ ПОДАЧІ ПОРОШКУ

О.І. Сом

ТОВ фірма «Плазма-Мастер Лтд», 02094, м. Київ, вул. Попудренка, 52, E-mail: [info@plasma-master.com](mailto:info@plasma-master.com)

Розроблено нову конструкцію плазмотрона для наплавлення сплавів на основі нікелю, кобальту та заліза. В ній поєднано дві системи подачі порошку в дугу – внутрішню та зовнішню. Таке поєднання розширює технологічні можливості плазмотрона і дозволяє наплавляти магнітні та немагнітні матеріали. Причому, ці системи можна використовувати як окремо одна від одної, так і разом, наприклад, для наплавлення композиційних сплавів з роздільною подачею матричного та армуючого матеріалів порошку. Для підвищення ефективності нагріву порошку при зовнішній подачі в плазмотроні застосовано допоміжний потік стабілізуючого газу, який дозволяє зменшити на 10-15 % втрати порошку та покращити формування наплавляемого валика. Оптимальні витрати стабілізуючого газу 4-5 л/хв. Плазмотрон ефективно працює в діапазоні струмів 50-300 А. Бібліогр. 8, рис. 9.

*Ключові слова:* плазово-порошкове наплавлення, конструкція плазмотрона, системи подачі порошку, ККД нагріву

**Вступ.** Плазмотрон є головним робочим інструментом обладнання для плазово-порошкового наплавлення (ППН). Від його ефективної та надійної роботи залежить багато в чому якість та стабільність процесу наплавлення в цілому. В свою чергу ефективність роботи плазмотрона визначається його тепловими характеристиками та ефективністю нагрівання і плавлення порошку у дузі, які в значній мірі залежать від схеми та параметрів його вводу в дугу.

Сьогодні найбільш широко використовуються дві схеми вводу порошку в дугу – внутрішня та зовнішня [1–3]. В першому випадку (рис. 1, а) порошок подається в дугу всередині плазмотрона у вигляді рівномірно розподіленого по колу потоку частинок через конічну щілину, утворену плазموутворюючим та фокуруючим соплами. У друго-

му (рис. 1, б) – ззовні плазмотрона через одне чи декілька отворів у торці плазموутворюючого сопла. В цьому випадку фокуруюче сопло відсутнє.

Математична модель [1] і експериментальні дослідження автора [3, 4] показують, що внутрішня схема подачі порошку більш ефективна. Вона забезпечує менші втрати порошку, краще формування наплавляемого валика та менші затрати енергії за тієї ж продуктивності наплавлення. Однак ця схема має два суттєвих недоліки. По-перше, при довготривалому напавленні, особливо легкоплавких матеріалів, можливе утворення крапель рідкого металу на виході з фокуруючого сопла, що призводить до порушення стабільності процесу, блокуванню подачі порошку та погіршенню формування наплавляемого валика.

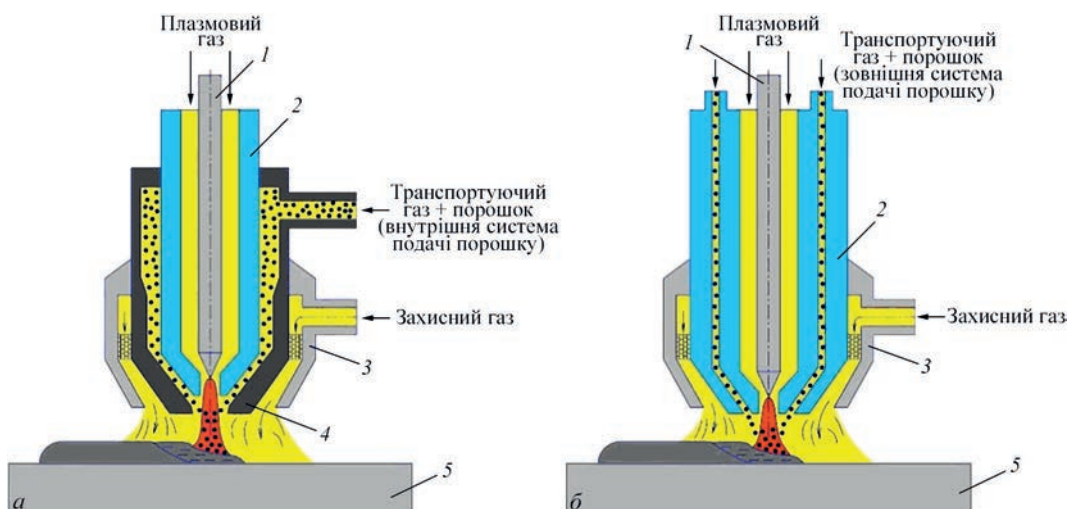


Рис. 1. Схеми подачі порошку в дугу: а – внутрішня; б – зовнішня (1 – електрод; 2 – плазموутворююче сопло; 3 – захисне сопло; 4 – фокууюче сопло; 5 – деталь)

© О.І. Сом, 2023

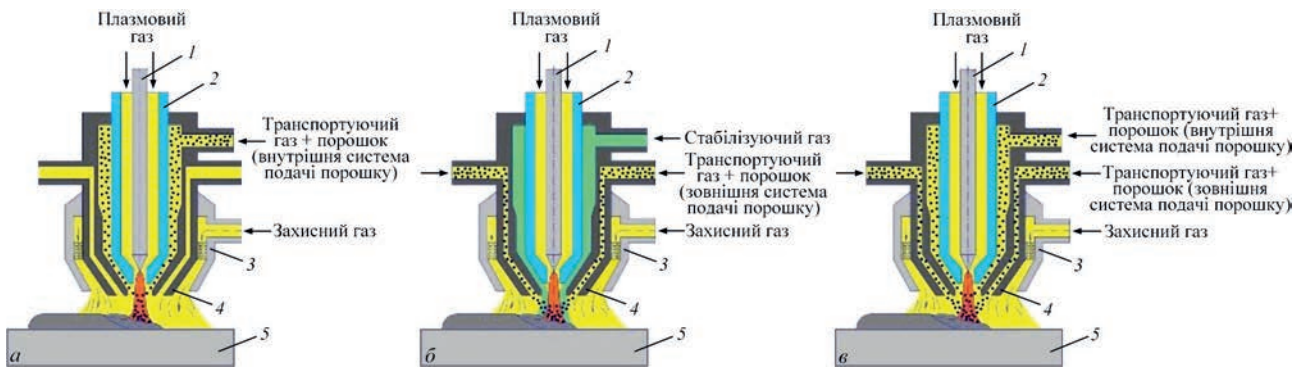


Рис. 2. Схема соплової частини плазмотрону з різними варіантами подачі порошку в дугу: а – внутрішня; б – зовнішня зі стабілізуючим газом; в – комбінована (внутрішня + зовнішня); 1 – електрод; 2 – плазмоутворююче сопло; 3 – захисне сопло; 4 – фокусує сопло; 5 – деталь.

По-друге, ускладнене наплавлення феромагнітних матеріалів, що мають у своїй структурі велику кількість феритної фази. Частинки порошку під впливом магнітного поля дуги зависають у розподільчій камері плазмотрону, утворюючи своєрідні пробки. Найбільш помітно це при струмі вище 150 А. При зовнішній схемі подачі порошку цей недолік відсутній.

Мета цієї роботи об'єднати в одному плазмотроні ці дві схеми і розробити таку конструкцію соплової частини, яка б розширила його технологічні можливості та підвищила стабільність роботи.

**Особливості конструкції нового плазмотрону.**

На рис. 2 показана схема соплової частини плазмотрону, яка об'єднує внутрішню (рис. 2, а) та зовнішню (рис. 2, б) схеми подачі порошку. Ці схеми можна використовувати як окремо одна від одної, так і разом (рис. 2, в; 5, в). Останній варіант дуже ефективний при напавленні композиційних сплавів з роздільною подачею матричного та армуючого матеріалів [5]. В цьому випадку використовується два окремих живильника порошку, які працюють синхронно, а також два окремих потоки транспортуючого газу.

На основі цієї ідеї розроблено два варіанти плазмотрону – вертикального (рис. 3, а) та горизонтального (рис. 3, б) виконання. Вони мають однакове конструктивне рішення соплової частини. Вибір того чи іншого варіанту залежить від конструктивних особливостей компоновки обладнання для наплавлення. Горизонтальний варіант більш універсальний, оскільки дозволяє напавляти як зовнішні, так і внутрішні поверхні на різну глибину.

**Технічні характеристики плазмотрону**

Струм непрямої (пілотної) дуги, А	30...50
Струм прямої дуги при ПВ = 100 %, А	50...300
Рід струму	постійний
Полярність	пряма
Робочий газ	аргон
Продуктивність наплавлення, кг/год.	1,0...8,0
Система вводу порошку в дугу	внутрішня та зовнішня
Фракція порошка, мкм	
– внутрішня система	63...200
– зовнішня система	53...150
Втрати порошку, %	
– внутрішня система	< 5
– зовнішня система	5...10
Загальні витрати газу, л/хв	14,0...22,0
Система охолодження	рідинна
Швидкість потоку охолоджуючої рідини, л/хв	> 4,0

Плазмотрони дозволяють напавляти сплави на основі нікелю, кобальту, заліза та композиційних сплавів на базі карбідів вольфраму.

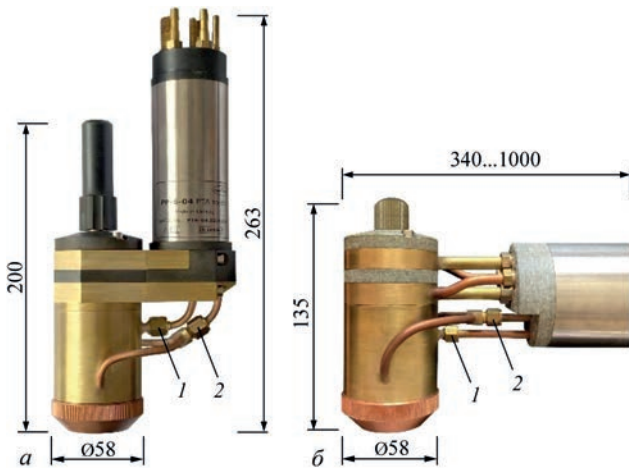


Рис. 3. Зовнішній вигляд плазмотронів з двома системами подачі порошку: а – вертикального типу РР-6-04; б – горизонтального типу РР-6-03М

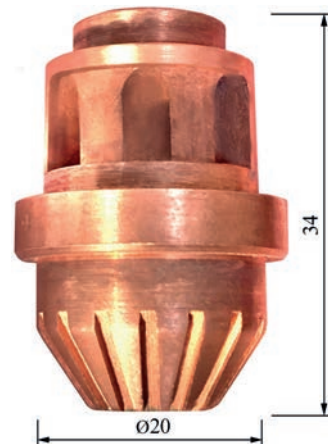


Рис. 4. Зовнішній вигляд плазмоутворюючого сопла

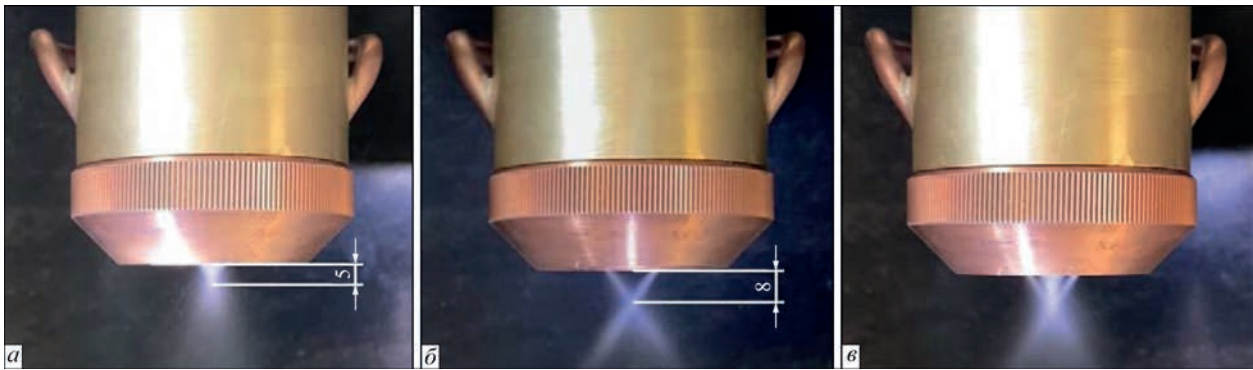


Рис. 5. Зовнішній вигляд факелів витікання порошку з плазмотрону при внутрішній (а), зовнішній (б) та комбінованій (в) схемах подачі порошку

**Варіанти подачі порошку.** Внутрішня подача порошку. При використанні системи внутрішньої подачі порошок через вхідний штуцер 1 (рис. 3, а, б) надходить в спеціальну розподільчу камеру, де він за допомогою транспортуючого газу рівномірно розподіляється по колу й потім через систему пазів, рівномірно розташованих на конічній поверхні плазмоутворюючого сопла (рис. 4), вдувається в дугу. Пази сприяють кращому охолодженню сопла та направляють частинки порошку прямо в центральну найбільш нагріту частину дуги. Кут вводу порошку в дугу відносно вертикальної вісі складає  $35^\circ$ . Фокус зустрічі частинок порошку знаходиться нижче торця фокусуєчого сопла на відстані 5 мм (рис. 5, а). Це зроблено для того, щоб виключити попадання частинок порошку на стінки фокусуєчого сопла і таким чином підвищити надійність роботи плазмотрону.

Для ефективного нагрівання порошку у дузі необхідно, щоб початкова швидкість входу частинок в дугу була якомога менша [1]. В даному плазмотроні за рахунок оригінальної конструкції розподільчої камери і оптимізації витрати транспортуєчого газу цей показник вдалося знизити до мінімального рівня. Для плазмотрону вертикального типу вона складає  $1,5 \dots 2,0$  м/с, горизонтального –  $2,0 \dots 2,5$  м/с, що цілком прийнятно для нагрівання частинок порошку діаметром  $50 \dots 160$  мкм, який широко використовується для ППН [6]. Для підтримки таких швидкостей витікання порошку оптимальними витратами транспортуєчого газу є  $3,5 \dots 4,0$  л/хв для вертикально-

го варіанту та  $4,5 \dots 5,0$  л/хв для горизонтального. Швидкість руху частинок визначали фотографічним методом покадрової зйомки [7].

**Зовнішня подача порошку.** По цій схемі порошок разом із транспортуєчим газом через спеціальний штуцер-трійник (рис. 3, а, б) розділяється на два рівномірних потоки і далі подається в дугу безпосередньо через два отвори діаметром 1,4 мм, розташовані в торці фокусуєчого сопла діаметрально протилежно один одному. Кут вводу порошку в дугу, такий же як і при внутрішній подачі –  $35^\circ$ . Точка зустрічі частинок порошку знаходиться на відстані 8 мм нижче від торця фокусуєчого сопла (рис. 5, б). Швидкість витікання частинок порошку на виході з плазмотрону як при вертикальному, так і при горизонтальному виконанні помітно вище, ніж при внутрішній подачі і складає відповідно  $2,5 \dots 3,0$  і  $3,0 \dots 3,5$  м/с. Це суттєвий недолік цієї схеми вводу порошку в дугу, оскільки збільшений швидкісний напір струменю холодного транспортуєчого газу глибоко проникає у стовп дуги, деформує його (рис. 6, б) та знижує температуру плазми в зоні нагріву. Деформація дуги призводить до погіршення нагрівання порошку і, як наслідок, збільшення його втрат і погіршення формування наплавляемого валика.

Для нейтралізації цього шкідливого впливу в даному плазмотроні використовується потік газу, який вдувається через центральний отвір фокусуєчого сопла, аналогічно тому, як подається транспортуєчий газ при внутрішній системі подачі порошку. Цей потік грає стабілізаційну роль.

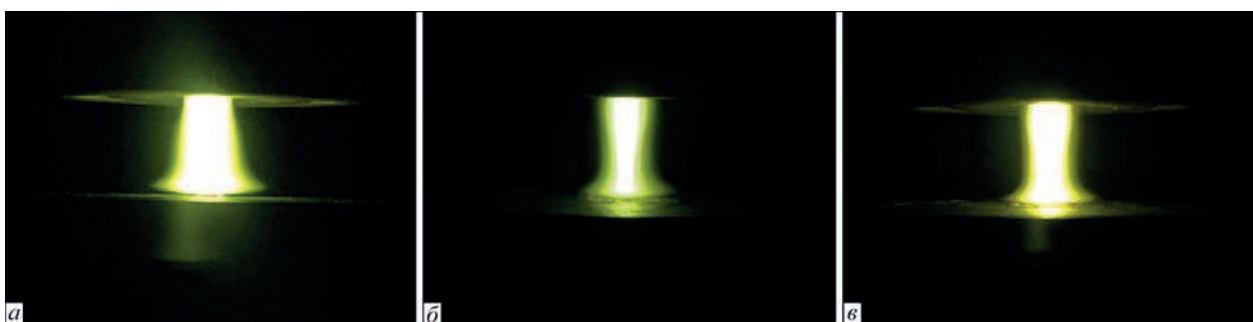


Рис. 6. Зовнішній вигляд стовпів дуги при внутрішній (а), зовнішній (б) та комбінованій (в) схемах подачі порошку

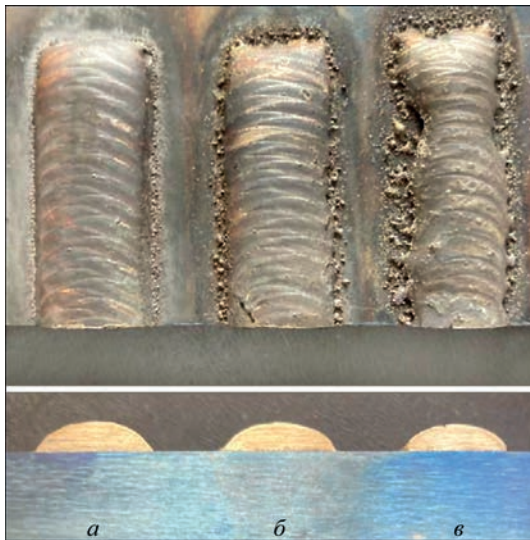


Рис. 7. Зовнішній вигляд і поперечний переріз валиків, наплавлених на однакових режимах при різних схемах вводу порошку в дугу: а – внутрішня; б – зовнішня зі стабілізуючим газом; в – зовнішня без стабілізуючого газу. Режим наплавлення:  $I_d = 160$  А;  $V_n = 80$  мм/хв;  $G_n = 16$  г/хв;  $Q_{ст.г.} = 4$  л/хв, наплавлений матеріал – сталь Х18Н10Т

Омиваючи концентрично периферійну область дуги зверху, він добре нагрівається і відтісняє холодні потоки транспортуючого газу в місцях бокового входу порошку. Стовп дуги вирівнюється, приймаючи більш циліндричну форму (рис. 6, в) і наближається до форми дуги при внутрішній подачі порошку (рис. 6, а). При цьому підвищується просторова стабільність дуги, що дозволяє збільшити її довжину до 14...15 мм і тим самим збільшити температуру нагріву порошку за рахунок більш довготривалого перебування його у дузі. Завдяки цьому зменшуються на 10...15 % втрати порошку по відношенню до зовнішньої подачі без стабілізуючого газу і покращується формування наплавляемого валика. На рис. 7 показано зовнішній вигляд, а також поперечний переріз валиків, наплавлених на однакових режимах при різних схемах вводу порошку в дугу. На ньому добре видно,

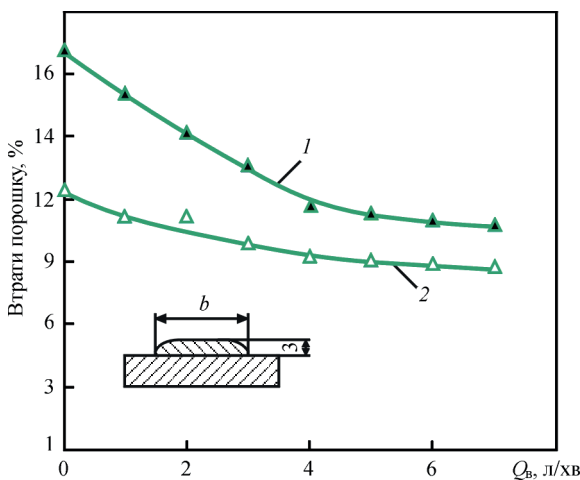


Рис. 8. Залежність втрат порошку від витрати стабілізуючого газу при різній ширині валика  $b$ : 1 – 10; 2 – 20 мм

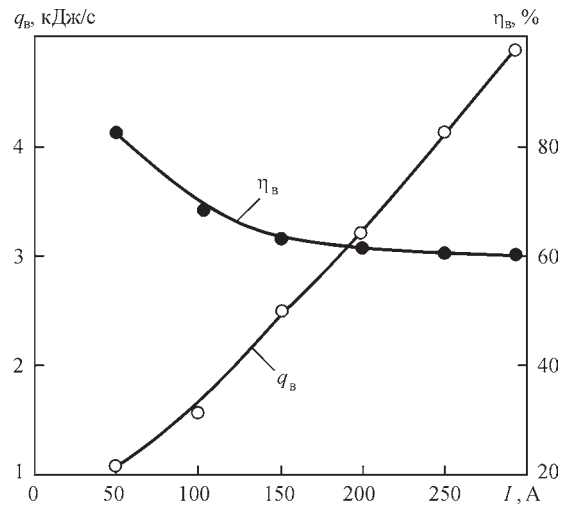


Рис. 9. Залежність ефективної теплової потужності  $q_v$  та ефективного ККД нагріву виробу  $\eta_v$  від струму дуги в розробленому плазмотроні

що допоміжний (стабілізуючий) потік газу суттєво покращує формування валика (рис. 7, б), наближаючи його до зовнішнього вигляду валика, наплавленого з внутрішньою подачею порошку (рис. 7, а).

Збільшується також повнота валика, що є підтвердженням менших втрат порошку (рис. 7, б). Як показано на рис. 8, максимальний ефект досягається при витраті стабілізуючого газу 4...5 л/хв. Це справедливо як для вузьких (крива 1), так і для широких (крива 2) валиків. Подальше збільшення його витрат вже не веде до збільшення позитивного ефекту.

**Теплові характеристики.** Теплові характеристики розробленого плазмотрону досліджували методом проточного калориметрування на модельному зразку по методиці, викладеній у роботі [3]. Головну увагу було приділено дослідженню ефективної теплової потужності та ефективного ККД нагріву виробу для даної конструкції соплової частини плазмотрону. Дослідження проводили за відсутності непрямої (пілотної) дуги.

На рис. 9 показана залежність ефективної теплової потужності  $q_v$  та ефективного ККД нагріву виробу  $\eta_v$  від струму дуги для комбінації плазموутворюючого та фокусуєчого сопел плазмотрону 4/8 мм на характерних для плазмового наплавлення витратах плазموутворюючого (2 л/хв), транспортуєчого (4 л/хв) та захисного (8 л/хв) потоків газу.

Видно, що зі збільшенням струму дуги  $q_v$  росте практично лінійно, але при цьому  $\eta_v$  падає. В діапазоні струмів 50...250 А він зменшується з 80 до 60 %, що пов'язано зі збільшенням теплових витрат у сопла. Загалом цей показник достатньо високий, близький до плазмотронів для зварювання та різки [8].

**Висновки**

1. Об'єднання внутрішньої та зовнішньої схем подачі порошку в дугу в одному плазмотроні

ні суттєво розширює його технологічні можливості, оскільки дозволяє наплавляти магнітні та немагнітні матеріали з високою ефективністю та продуктивністю.

2. Додатковий потік стабілізуючого газу при зовнішній схемі подачі порошку зменшує шкідливий вплив холодних струменів транспортуючого газу та знижує на 10...15 % витрати порошку за рахунок більш ефективного його нагріву. Оптимальні витрати стабілізуючого газу 4...5 л/хв.

3. Розроблений плазмотрон забезпечує достатньо високий ККД нагріву виробу. На максимальних струмах він не нижче 60 %.

### Список літератури

1. Гладкий П.В., Павленко А.В., Зельниченко А.Т. (1989) Математическое моделирование нагрева порошка в дуге при плазменной наплавке. *Автоматическая сварка*, **11**, 17–21, 54.
2. Dilthey, U., Ellermeier, J., Gladkij, P., Pavlenko, A.V. (1993) Kombiniertes Plasma-Pulver-Auftragschweissen. *Schweissen und Schneiden*, **5**, 241–244.
3. Сом А.И. (1999) Новые плазматроны для плазменно-порошковой наплавки. *Автоматическая сварка*, **7**, 44–48.
4. Сом А.И. (2015) Влияние схемы ввода порошка в дугу на его потери и эффективность процесса плазменно-порошковой наплавки. *Автоматическая сварка*, **5-6**, 26–29.
5. Сом А.И., Галагуз Б.А. (2020) Плазменно-порошковая наплавка композиционных сплавов с раздельной подачей карбидов вольфрама и матричного сплава. *Автоматическая сварка*, **12**, 33–43.

6. Гладкий П.В., Переpletчиков Е.Ф., Рябцев И.А. (2007) *Плазменная наплавка*. Киев, ЭкоТехнология.
7. Сидоров А.И. (1987) *Восстановление деталей машин напылением и наплавкой*. Москва, Машиностроение.
8. Стихин В.А., Пацкевич И.Р. (1967) Определение тепловых характеристик сжатой дуги. *Сварочное производство*, **9**, 26–27.

### References

1. Gladky, P.V., Pavlenko, A.V., Zelnichenko, A.T. (1989) Mathematical modeling of heating of powder in arc during plasma surfacing. *Avtomatich. Svarka*, **11**, 17–21, 54 [in Russian].
2. Dilthey, U., Ellermeier, J., Gladkij, P., Pavlenko, A.V. (1993) Kombiniertes Plasma-Pulver-Auftragschweissen. *Schweissen und Schneiden*, **5**, 241–244.
3. Som, A.I. (1999) New plasmatorches for plasma-powder surfacing. *Avtomatich. Svarka*, **7**, 44–48 [in Russian].
4. Som, A.I. (2015) Effect of scheme of powder feeding into arc on its losses and efficiency of plasma-powder surfacing process. *The Paton Welding J.*, **5-6**, 22–25.
5. Som, A.I., Halahuz, B.A. (2020) Plasma transferred arc surfacing of composite alloys with separate feed of tungsten carbides and matrix alloy. *The Paton Welding J.*, **12**, 34–39. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.12.05>
6. Gladky, P.V., Pereplyotnikov, E.F., Ryabtsev, I.A. (2007) *Plasma surfacing*. Kyiv, Ekotekhnologiya [in Russian].
7. Sidorov, A.I. (1987) *Restoration of machine parts by spraying and surfacing*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
8. Stikhin, V.A., Patskevich, I.R. (1967) Determination of thermal characteristics of constricted arc. *Svarochn. Proizvodstvo*, **9**, 26–27 [in Russian].

## PLASMA TORCH FOR PLASMA TRANSFERRED ARC SURFACING WITH TWO POWDER FEEDING SYSTEMS

O.I. Som

Plasma-Master Co., Ltd., 52 Popudrenko Str., 02094, Kyiv, Ukraine. E-mail: [info@plasma-master.com](mailto:info@plasma-master.com)

A new design of the PTA torch (PTA torch) for surfacing of nickel, cobalt and iron-based alloys was developed. It combines two systems of powder feeding into the arc: the internal and external one. Such a combination expands the technological capabilities of the PTA torch, and allows surfacing magnetic and nonmagnetic materials. These systems can be used both separately from each other and together for surfacing composite alloys with separate feeding of the matrix and reinforcing powder material. In order to increase the efficiency of powder heating at external feeding into the PTA torch, an auxiliary stabilizing gas flow is used, which allows reducing the powder losses by 10–15 % and improving the deposited bead formation. Optimal flow rates of stabilizing gas are 4–5 l/min. The PTA torch effectively operates in the current range of 50–300 A. 8 Ref., 9 Fig

*Keywords: plasma transferred arc surfacing, PTA torch design, powder feeding systems, heating efficiency*

Надійшла до редакції 28.06.2023

