

## ФІЗИЧНІ ТА ТЕХНІЧНІ ПЕРЕДУМОВИ СТВОРЕННЯ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПЛАЗМОТРОНІВ

**В.В. Степаненко, І.В. Шейко, Д.М. Жиров, Т.І. Дубова, В.В. Барабаш**

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Розглянуто фізичні та технічні аспекти створення дугових плазмотронів, призначених для роботи в металургійних плавильних агрегатах і печах. На основі аналізу літературних джерел запропоновано класифікувати металургійні плазмотрони за принципом нагріву плазмоутворюючого газу до плазмового стану. Згідно такої класифікації всі металургійні плазмотрони поділено на чотири групи: дугові, індукційні, електронні та паливні. Показано, яким чином у кожній групі здійснюються нагрів газу до плазмового стану та вплив технологічних чинників (витрати і склад газу, величина робочого струму та ін.) на температуру плазми та її технологічні властивості. Розглянуті особливості горіння плазмових дуг змінного струму. Сформульовані вимоги, яких необхідно дотримуватись при конструюванні металургійних плазмотронів. Бібліогр. 16, табл. 1, рис. 9.

*Ключові слова:* електрична дуга; плазмова дуга; плазмотрон; температура плазми; робочий струм; вольт-амперна характеристика; градієнт температур; плазмоутворюючий газ

Плазмова металургія виникла і почала інтенсивно розвиватися на початку 60-х років минулого століття і сьогодні застосовується в багатьох технічно розвинутих державах. Плазмовий нагрів використовується на багатьох стадіях металургійного виробництва, що включає вилучення металів із руд, виплавку та рафінування металів і сплавів в плазмових реакторах та печах, а також з метою інтенсифікації існуючих процесів металообробки.

Широке впровадження плазмових плавильних агрегатів і печей в промисловість вимагає створення економічних та надійних у роботі генераторів низькотемпературної плазми — плазмотронів.

У металургійних процесах низькотемпературна плазма виконує кілька функцій: по-перше, це незалежне гнучко регульоване за температурою та потужністю джерело тепла, котре дозволяє отримувати достатньо високу температуру газів в обмеженому просторі; по-друге, це ефективний засіб для інтенсифікації фізико-хімічних реакцій, які в умовах традиційної металургії або перебігають з малою швидкістю, або взагалі не можливі. Тому застосування плазмового нагріву в металургії обумовлює зміну класичної схеми виробництва металів, створює на цій основі принципово нові процеси і технології виплавки, рафінування та легування металів і сплавів, а також стимулює розширення функціональних можливостей плавильних агрегатів. У низці випадків можна замінити багатостадійне виробництво металів їх прямим відновленням, особливо при використанні порохоподібних вихідних матеріалів.

Тому, на наш погляд, доцільно попередньо розглянути деякі фізичні процеси і характеристики,

притаманні низькотемпературній плазмі, що генерується дуговими плазмотронами.

Газ у нормальних умовах складається із нейтральних молекул та атомів і тому не здатний проводити електричний струм. Під дією зовнішніх чинників може відбуватися іонізація газу, в результаті якої з'являються електричнозаряджені частинки (електрони та позитивно заряджені іони). Іонізація — процес, у результаті якого відбувається відрив електронів від атомів або молекул газу. Вона може бути одноразовою або багаторазовою в результаті відриву одного або кількох електронів відповідно.

Наявність вільних електронів зумовнює високу електропровідність стовпа електричної дуги або плазми, яка за величиною порівняна з електропровідністю металу. Енергія, що необхідна для відриву електрона від атома або молекули, називається енергією іонізації і вимірюється в електрон-вольтах (eV).

Для відриву електрона від атома необхідно передати атому достатньо велику кількість енергії в межах  $(1...10)^6$  eV. Це свідчить, що вільні електрони мають рівнозначний запас енергії. Оскільки 1 eV відповідає енергії теплового руху при температурі біля 11400 K, область існування газу в плазмовому стані знаходиться в межах температур  $10^4...10^{10}$  K [1].

Іонізація газу у стовпі електричної дуги може відбуватися під дією двох чинників — високої температури (термічна іонізація) та поглинання квантів енергії випромінювання (фотоіонізація). У першому випадку процес іонізації є результатом співударів атомів, іонів та електронів згідно з реакціями:



Д.М. Жиров — <https://orcid.org/0000-0002-9435-8075>

У другому випадку відрив електронів від атомів відбувається в результаті поглинання кванта енергії за реакцією:



де  $a$ ,  $e$ ,  $i$  та  $hv$  — відповідно символи атома, електрона, іона та фотона.

Плазмовий стан речовини характеризується ступенем іонізації та температурою. Ступінь іонізації — одна із основних фізичних характеристик плазми і визначається як відношення кількості заряджених частинок  $x_1$  до їх загальної кількості  $x$ , тобто  $x_1/x$ .

Ступінь іонізації залежить від виду газу, температури та тиску і може бути описана відомим рівнянням Саха за умови рівноваги процесів іонізації та рекомбінації [1, 2]

$$\frac{x^2}{1-x^2} p = 2,4 \cdot 10^{-4} a^2 T^{2,5} \exp\left(-\frac{e_0 U}{kT}\right), \quad (4)$$

де  $x$  — відношення числа іонів або електронів до повного числа нейтральних молекул в одиниці об'єму до процесу іонізації;  $p$  — тиск, Па;  $T$  — температура, К;  $e_0 U$  — робота іонізації;  $k$  — постійна Стефана–Больцмана.

Відповідно до формули (4) ступінь іонізації збільшується при підвищенні температури та зниженні тиску. Рівняння Саха дає задовільні результати для малих і середніх значень ступеня іонізації, але у випадку іонізації, близької до одиниці, результати розрахунку не відповідають реальній ситуації в електродуговому розряді.

На рис. 1 наведені графічні залежності ступеня іонізації ( $X$ ) елементів, що широко розповсюджені у металургійному виробництві, від температури [3].

Якщо плазмоутворюючий газ являє собою суміш із кількох компонентів, то газ з найменшим потенціалом іонізації іонізується сильніше, а з більшим потенціалом — слабше, ніж кожен з них окремо при тій же температурі і тиску суміші.

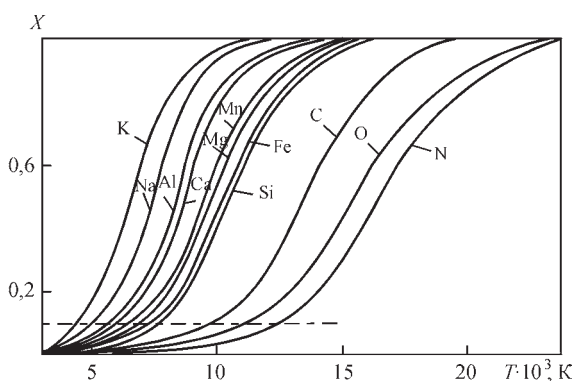


Рис. 1. Залежність ступеня іонізації деяких елементів від температури

У залежності від ступеня іонізації розрізняють низькотемпературну (холодну) та високотемпературну (гарячу) плазму.

Низькотемпературна плазма має температуру близько  $(0,5...3,0) \cdot 10^4$  К і являє собою іонізовану газову систему, ступінь іонізації якої не перевищує 1% ( $\alpha \approx 0,01$ ). Електропровідність холодної плазми значно менша порівняно з гарячою плазмою і може змінюватися в широких межах у залежності від напруженості електричного потенціалу, тиску та хімічного складу суміші.

Ступінь іонізації часток у гарячій плазмі близька до одиниці ( $\alpha \approx 1$ ), а їх температура може сягати  $10^6...10^8$  К. Гаряча плазма має дуже високу електропровідність, яка наближається до електропровідності металів.

Одночасно з іонізацією в плазмі відбувається процес рекомбінації — створення нейтральних атомів у результаті взаємодії позитивно заряджених іонів з електронами. Цей процес супроводжується значним виділенням енергії, яка кількісно дорівнює енергії іонізації.

Крім того відбувається дифузія заряджених часток із зони більшої концентрації в зону меншої. Як правило заряджені частки переміщуються з центральної зони на периферію. При досягненні краю розрядного проміжку частки мають достатню швидкість, щоб покинути дуговий розряд, і таким чином відбувається розсіювання часток в середовище, що оточує розряд.

Маса електронів порівняно мала і тому їх швидкість значно вища за швидкість іонів. У результаті електрони мають більшу тенденцію до вильоту з дугового стовпа. У стовпі дугового розряду, який являє собою достатньо іонізоване середовище, в якому концентрації електронів та іонів майже рівні, більш рухливий електрон, залишаючи дуговий розряд, може витягнути за собою позитивний іон. Таким чином, із стовпа дугового розряду відбувається одночасне вилучення зарядів обох знаків.

Якби з дугового розряду вилітали тільки електрони, не захоплюючи позитивних іонів, то в стовпі дугового розряду залишалися би тільки позитивні іони і це б призводило до гасіння дугового розряду.

У той же час в результаті руху іонів та електронів відбувається їх взаємодія, яка проявляється в притягуванні електронів до позитивних іонів, і тим самим рух електронів сповільнюється. Така дифузія, ускладнена взаємодією часток, що мають протилежні знаки, називається амбіполярною.

Швидкість дифузії через будь-яку циліндричну поверхню (стовп дугового розряду можна розглядати як полий циліндр) прямо пропорційна концентрації часток і зворотнопропорційна квадрата

ту радіуса циліндра [1, 2] і описується наступним рівнянням

$$\frac{dn}{d\tau} = -D \frac{n}{r^2}, \quad (5)$$

де  $n$  — концентрація часток;  $D$  — коефіцієнт дифузії;  $r$  — радіус умовного циліндра.

Коефіцієнт дифузії залежить від середньої швидкості часток ( $V$ ) і довжини вільного пробігу ( $\lambda$ ) та може бути розрахований за емпіричною формулою  $D = \lambda V/3$  [2]. У дуговому розряді швидкість дифузії визначається швидкістю руху іонів, як більш повільних часток. Тому і коефіцієнт дифузії та довжина вільного пробігу визначаються характером руху позитивних іонів. За наявності вказаних величин можна визначити інтенсивність дифузії заряджених часток із стовпа дуги. Однак, як свідчать розрахунки багатьох дослідників, вплив дифузії на стан стовпа дуги незначний, особливо для дуг з великим значенням струму, наприклад пічних [3, 4].

Перехід газу в іонізований стан може бути обумовлений різними механізмами взаємодії між частками, головним з яких є процес зіткнення часток газу. На практиці іонізація газу може здійснюватися різними способами: нагрівом його до відповідної температури з використанням, наприклад, електричного розряду; накладанням на розрядний проміжок сильного електромагнітного поля або опроміненням.

Перехід газу або суміші газів в іонізований стан у результаті нагріву до певної температури — термічна іонізація. Енергія іонізації атома хімічного елемента має різні значення в залежності від оболонки, в якій знаходиться електрон, та ступеня її заповнення (таблиця) [5].

Найбільш міцний зв'язок зовнішніх електронів з атомами у інертних газів (гелій, аргон та ін.), а найслабкіший — в одновалентних лужних металів (літій, натрій, калій). Тому добавка парів лужних металів з низьким потенціалом іонізації значно полегшує отримання низькотемпературної плазми в середовищі інертних газів, які використовуються в плазмовій техніці найчастіше. Присутність парів лужних металів дозволяє отримувати достатню електропровідність газу вже при температурі 2000...3000 К. Але для отримання термічної іонізації газу, близької до 100 %, необхідна температура в кілька десятків тисяч градусів. У деяких випадках енергія зіткнення може виявитися значно більшою, ніж потенціал іонізації, і тоді відбудеться багатократна іонізація.

В реальних умовах процес термічної іонізації значно складніший. У нагрітому газі може відбуватися дисоціація молекул газу на атоми і, крім того, при зіткненні часток енергія, що передається

Енергія іонізації атомів хімічних елементів

Елемент	Атомна маса	Енергія іонізації, еВ	Елемент	Атомна маса	Енергія іонізації, еВ
H	1,0	13,595	Cl	35,5	13,01
He	4,0	24,59	Ar	39,9	15,78
Li	6,9	5,39	K	39,1	4,34
B	10,8	8,30	Ca	40,0	6,11
C	12,0	11,26	Ti	47,9	6,82
N	14,0	14,53	V	50,9	6,74
O	16,0	13,61	Cr	52,0	6,76
F	19,0	17,42	Mn	54,9	7,43
Na	22,9	5,14	Fe	55,8	7,90
Mg	24,3	7,64	Co	58,9	7,86
Al	26,9	5,98	Ni	58,7	7,63
Si	28,0	8,15	Cu	63,5	7,72
P	30,9	10,48	Zn	65,4	9,39
S	32,0	10,36	Mo	95,9	7,10

нейтральній молекулі, може виявитися меншою, ніж енергія, яка необхідна для дисоціації молекули. У такому випадку молекула газу перейде у збуджений стан.

Іонізація за рахунок опромінення можлива тільки в надто розрідженому газовому середовищі, де зіткнення частинок практично відсутні. Як приклад природної іонізації можна навести іонізацію верхніх шарів атмосфери під дією опромінення сонцем. У техніці отримання плазми за допомогою опромінення практично не використовується, оскільки існують більш ефективні та прості методи.

Найбільш розповсюдженим методом генерації низькотемпературної плазми в газі є використання електричного розряду. У техніці використовують різноманітні види електричних розрядів — від іскри до електричної дуги. Механізм іонізації в електричному розряді зводиться до утворення електронної лавини (рис. 2) [1, 2].

Процес іонізації за допомогою електромагнітного поля можна здійснити при накладанні на газовий проміжок такого електромагнітного поля, яке б передавало атому на довжині його вільного пробігу більше енергії, ніж її потрібно на вибивання із атома одного електрона. Для цього в газовому середовищі достатньо утворення деякої кількості вільних електронів, запас кінетичної енергії в яких достатній для вибивання нових електронів. При цьому процес їх розмноження відбувається в геометричній прогресії (лавиноподібно).

Температура на осі електричної дуги, яка вільно горить у просторі, як правило не перевищує  $(5...7) \cdot 10^3$  К, а середньомасова становить не більше 3000 К. Ускладнення в підвищенні температури такої дуги полягають у тому, що при підвищенні струму, що підводиться до дуги, відбувається збільшення площини перетину стовпа дуги [13].

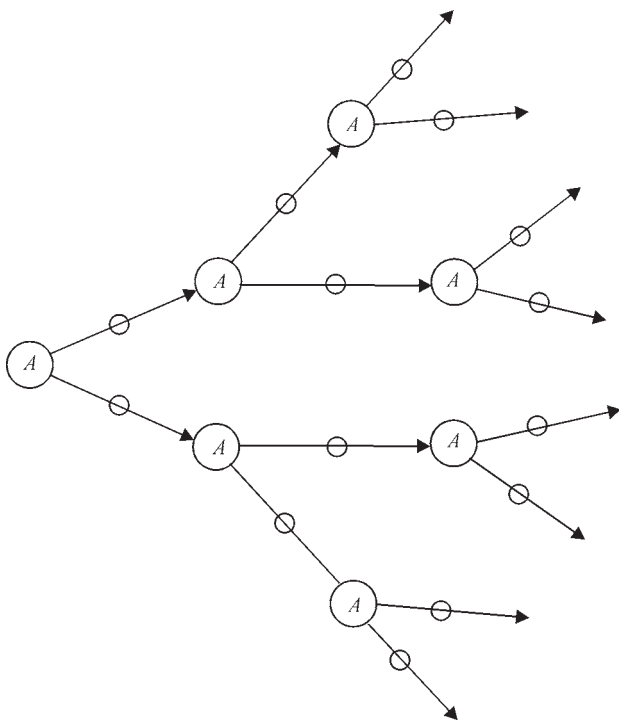


Рис. 2. Схема електронної лавини в електромагнітному розряді: A — атоми газу; Θ — електрони

При цьому опір її дещо зменшується, а щільність струму практично не змінюється. Тому вольт-амперна характеристика дуги, що горить вільно, має падаючий характер [3, 6].

При проходженні стовпа електричної дуги через канал сопла з одночасним його обдуванням потоком холодного газу відбувається примусове охолодження периферії дуги, яке приводить до інтенсифікації теплообмінних процесів. Крім того, примусове охолодження периферії дуги газовим потоком сприяє термічному обтисненню стовпа дуги, що в свою чергу, підсилює стискуючу дію власного магнітного поля дуги (явище пінч-ефекта). У результаті зростають напруженість електричного поля дуги та електрична потужність, яка виділяється в одиниці об'єму стовпа дуги. Це призводить до того, що температура на осі дуги зростає і досягає значень, характерних для низько-

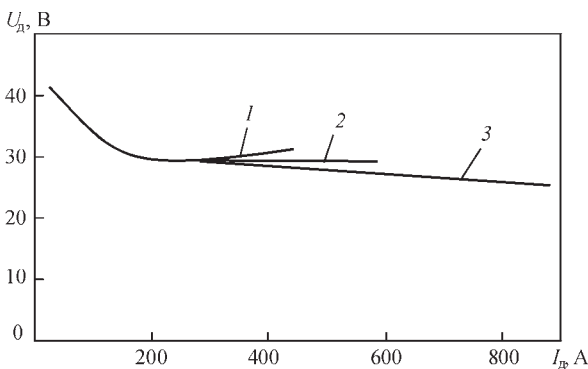


Рис. 3. Вольт-амперна характеристика електричної дуги ( $l_d = 5$  мм), що горить між двома вольфрамовими електродами діаметром, мм: 1 — 2; 2 — 4; 3 — 10

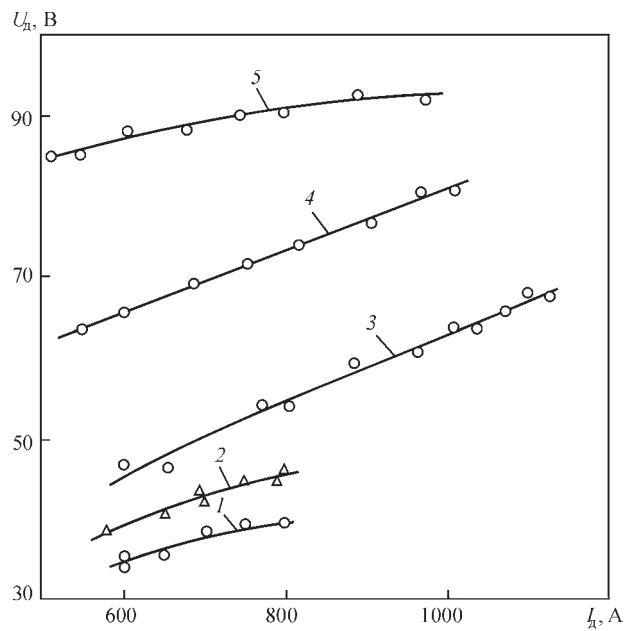


Рис. 4. Вольт-амперна характеристика металургійного плазмотрона ( $d_c = 12$  мм,  $P = 156$  кПа): о — постійний струм; Δ — змінний струм; 1 —  $l = 70$  мм,  $Q_{Ar} = 0,59$  г/с; 2 —  $l = 70$  мм,  $Q_{Ar} = 0,59$  г/с; 3 —  $l = 75$  мм,  $Q_{Ar} = 0,59$  г/с; 4 —  $l = 115$  мм,  $Q_{Ar} = 0,59$  г/с; 5 —  $l = 145$  мм,  $Q_{Ar} = 0,59$  г/с

температурної плазми —  $(2...3) \cdot 10^4$  К, а вольт-амперна характеристика має зростаючий характер (рис. 4) [6–9].

Принцип роботи плазмотронів прямої дії, оснований на підключенні виробу, що нагрівається, в ланцюг дуги, в термічному відношенні більш ефективний в порівнянні з плазмотронами посередньої дії. При однаковій силі струму ефективна потужність (потужність, яка передається металу при його нагріві) на 40 % більше, ніж вільногорящої дуги і майже на 60 % більше, ніж при нагріванні струменевою плазмою.

Плазмовий стовп обтисненої дуги в перерізі досить неоднорідний у температурному відношенні (рис. 5) [7]. Найбільша температура газу, а отже і найбільша ступінь його іонізації досягається у вузькому шнурі усередині стовпа дуги. Цей шнур має високу електропровідність і являє собою канал, по якому протікає робочий струм від катода до анода. На периферії стовпа ступінь іонізації, температура та електропровідність різко падають і наближаються до рівня середовища, що оточує дугу [10].

На розподіл температури в плазмовій дузі значний вплив має витрата плазмоутворюючого газу [8]. На рис. 6 наведені ізотерми температурного поля плазмових дуг, що горять в атмосфері аргону. Із наведених даних видно, що температура плазмових дуг знижується в радіальному напрямку від осі до периферії та по довжині від сопла до виробу. Причому зі збільшенням витрат аргону зміни в температурі мають більшу контрастність [11].

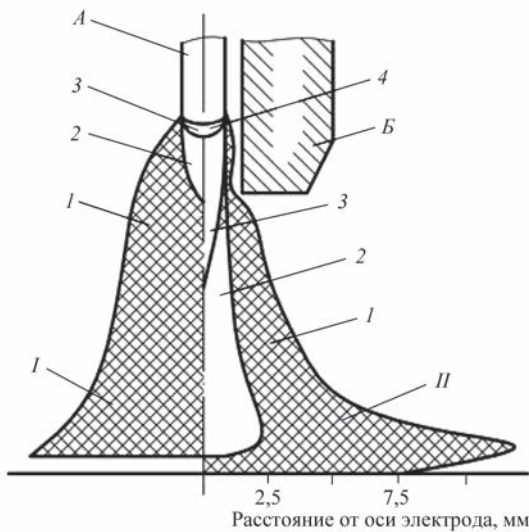


Рис. 5. Розподіл температури в дузі, яка горить вільно (I) та обтисненій дузі (II) в середовищі аргону (A — електрод з вольфраму; B — сопло;  $I_n = 200$  А): 1 —  $(10...14) \cdot 10^3$  К; 2 —  $(14...18) \cdot 10^3$  К; 3 —  $(18...24) \cdot 10^3$  К; 4 —  $> 24 \cdot 10^3$  К

Більш значний вплив на температурну ситуацію в стовпі плазмової дуги справляє добавка в аргон двоатомних газів азоту або водню (рис. 7) [8].

Розробка тих чи інших металургійних процесів і технологій неможлива без знання особливостей роботи та конструкції плазмотронів.

Незважаючи на різноманітність конструктивних рішень, обумовлених різними сферами застосування плазмотронів, в їх основу закладена обмежена кількість принципів схем, різниця між якими полягає, головним чином, в методах просторової стабілізації плазмової дуги та заходах щодо зниження ерозії електродів в зонах дії опорних плям дуги.

Численну різноманітність конструкцій плазмотронів, що склалася виходячи з багатьох конструктивних ознак, буде правильно класифікувати за принципом дії, тобто за методом нагріву газу і переходу його в плазмовий стан та перетворення електричної енергії в теплову. За вказаним принципом плазмотрони поділяють на: дугові; індукційні; електронні; паливні.

У промисловості, в тому числі металургії, набули широкого вжитку плазмотрони, в яких перехід газу в стан низькотемпературної плазми відбувається за рахунок енергії електричної дуги (дугові плазмотрони).

Попередньо нагрітий до відповідної температури газ, частково іонізований, можна нагрівати далі, використовуючи для цього енергію електромагнітного поля, яке створює змінний струм, що протікає в індукторі. Такий принцип нагріву газу відбувається в індукційних плазмотронах.

Нагрів газу до плазмового стану може здійснюватися за рахунок енергії електромагнітного поля

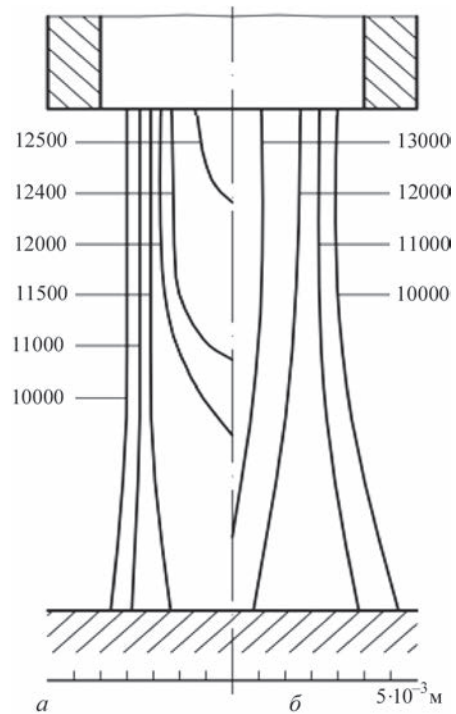


Рис. 6. Ізотерми температурного поля плазмових дуг, що горять в аргоні (потужність 12 кВт при витратах аргону 0,3 (а) та 1,2 м<sup>3</sup>/год (б))

високої напруги. Саме такий процес відбувається в електронних плазмотронах.

До генераторів низькотемпературної плазми можна віднести паливно-кисневі пальники, в яких звичайне повітряно-кисневе полум'я додатково підігрівають, пропускаючи через нього електричний струм.

Дугові плазмотрони, в свою чергу, класифікують за наступними ознаками: принципом підключення плазмотрона до джерела живлення та передачі тепла виробу (плазмотрони посередньої та прямої дії); родом струму, що застосовується (плазмотрони постійного та змінного струму); конструкцією (видом) електрода в плазмотроні (плазмотрони зі стержневим, набірним, порожнистим,

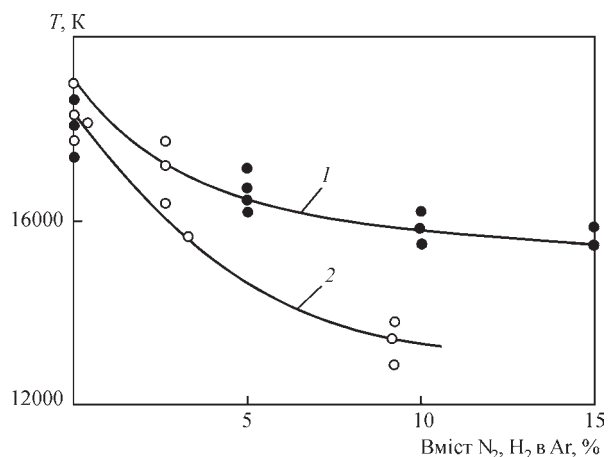


Рис. 7. Залежність температури від вмісту азоту (1) і водню (2) в плазмоутворюючому газі (аргоні)

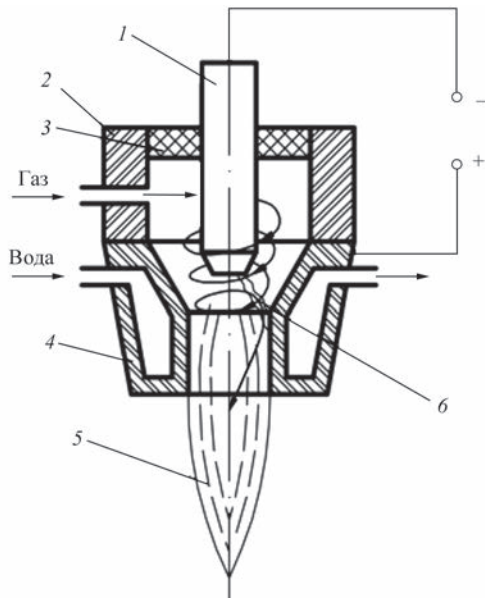


Рис. 8. Принципова схема дугового плазмотрона посередньої дії: 1 — стержневий електрод; 2 — корпус; 3 — ізолятор; 4 — сопло; 5 — плазмовий струмінь; 6 — електрична дуга

розщепленим та плазмовим електродом); способом обтиснення дуги (плазмотрони з обтисненням дуги газовим струменем або холодною стінкою каналу сопла); видом охолодження катода і сопла (плазмотрони з водяним та газовим охолодженням); складом плазмоутворюючого газу (плазмотрони, що працюють в інертному, відновлювальному, окислюючому середовищах та у вакуумі).

Головною відмінністю плазмотронів посередньої та прямої дії є різниця в передачі тепла від

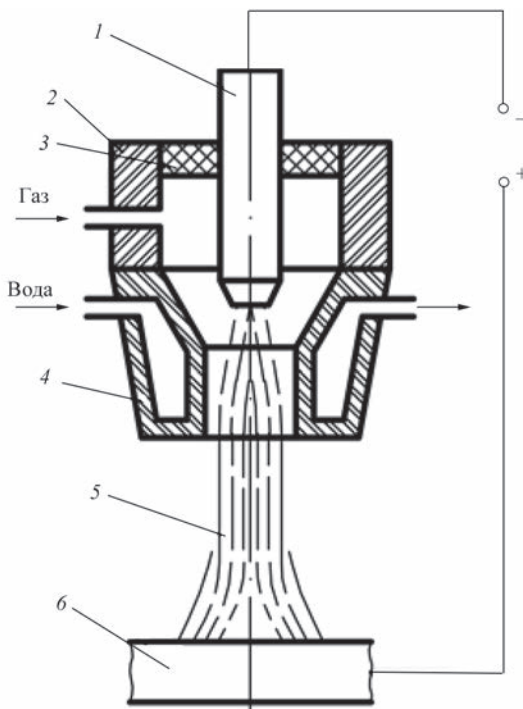


Рис. 9. Принципова схема дугового плазмотрона прямої дії: 1 — стержневий електрод; 2 — корпус; 3 — ізолятор; 4 — сопло; 5 — плазмова дуга; 6 — тіло, що нагрівається

низькотемпературної плазми до тіла, яке нагрівається. Указана відмінність полягає в тому, що в струменевих плазмотронах (посередньої дії) електрична дуга, необхідна для іонізації газу, горить в проміжку між стержневим електродом і соплом (рис. 8). Під дією тепла дуги відбувається часткова іонізація газового струменя і назовні із сопла він витікає у вигляді полум'я (низькотемпературна плазма), яке нагадує факел газозварювального пальника.

Передача теплової енергії до тіла, що нагрівається, відбувається в два етапи: спочатку нагрівається газ в електричній дузі, а уже потім нагрітий газ віддає тепло виробу. Тіло, що нагрівається, не входить в електричний ланцюг плазмової дуги, отже воно може бути і діелектриком. Це дозволяє нагрівати або термічно обробляти матеріали, які за своїми фізичними характеристиками можуть бути як провідниками, так і діелектриками.

У дугових плазмотронах прямої дії електрична дуга горить безпосередньо між електродом плазмотрона і виробом (тілом), що нагрівається (рис. 9). При цьому дугу в повздожньому напрямку обдувають струменем плазмоутворюючого газу, а в поперечному — (по периметру) обтискують стінкою сопла, що охолоджується.

У плазмотронах прямої дії основна частина енергії електричної дуги передається виробу через опорну пляму, яка розміщується на поверхні металевого тіла, що нагрівається. Таким чином, виріб, який нагрівається, входить до складу електричного ланцюга плазмової дуги і отже він повинен бути електропровідним. Це забезпечує більш високий ККД нагріву.

У металургійних плавильних агрегатах широкого вжитку набули дугові плазмотрони саме прямої дії, під час роботи яких електрична високоструменева дуга суміщена з потоком плазмоутворюючого газу. Метою даної роботи є аналіз фізичних процесів і явищ, які протікають у дугових плазмотронах при нагріві газу до плазмового стану та розробка підходів і заходів щодо конструювання металургійних плазмотронів з підвищеним ресурсом роботи [14].

Наприклад, при плавці плазмотроном прямої дії в атмосфері, що містить азот, анодна пляма дуги знаходиться на поверхні металеві ванни. Температура в зоні анодної плями може досягати температури кипіння металу [6, 12] і пружність зустрічного потоку пару металу може наблизитися до атмосферного тиску, а парціальний тиск азоту — до нуля. В даному випадку в зоні анодної плями можна спостерігати відсутність або зниження ефективності поглинання азоту металом. Експериментально це було показано в роботі [13]. У випадку, коли ванна є анодом на її по-

верхні спостерігається три зони: зона анодної плями, де метал контактує з атомарним газом, а температура поверхні наближається до температури кипіння металу; кільцева зона під плазмовим факелом, в якій метал контактує з молекулярним газом у збудженому стані; зона відносно низьких температур за плазмовим факелом, де рідкий метал контактує з молекулярним газом в основному коливальному стані.

Якщо метал, що плавиться, має низький вміст розчиненого газу, то відбуваються наступні процеси [13]: в анодній плямі метал активно випаровується і над його поверхнею створюється парова фаза, в якій тиск парів рівний барометричному, що перешкоджає контакту металу з газом. В такому разі потік газу із атмосфери дуги в метал відсутній.

В кільцевій зоні під плазмовим факелом з рідким металом взаємодіють молекули газу в збудженому стані і, можливо, якась частина атомів. В цій зоні хімічний потенціал газу над поверхнею металевої ванни значно вищий за хімічний потенціал газу, який розчинений в металі. Саме в цій зоні відбувається інтенсивне поглинання газу металевою ванною.

Далі від осі плазмового факела температура плазми знижується, а отже знижується і активність газових часток. В зоні за плазмовим факелом метал контактує з молекулами газу в основному коливальному стані. Тут відбувається звичайне поглинання газу, яке відповідає парціальному тиску газу в газовій фазі і константі Сівертса.

Металургійні дугові плазмотрони працюють в умовах інтенсивних теплових потоків на протязі всієї плавки, яка може тривати кілька годин поспіль. Крім того склад газового середовища в плавильній камері може бути достатньо агресивний [15, 16]. Цим, а також другими специфічними особливостями умов праці плазмотронів визначається перелік вимог щодо їх конструкції, матеріалів, з яких виготовляються відповідні деталі та елементи, а також ресурс роботи, техніко-економічні показники і т. п.

Розглядаючи різноманітність умов, в яких працюють металургійні плазмотрони, порівнюючи різні точки зору щодо фізичних процесів, які протікають у приелектродних областях, та аналізуючи ресурс роботи окремих елементів плазмотронів, автори спробували узагальнити вимоги до металургійних плазмотронів, які можна звести до наступного: конструкція плазмотрона і матеріали електрода та сопла повинні забезпечувати гарне формування і стійке горіння плазмової дуги в пічному просторі під час плавки; електрод і сопло повинні мати високий ресурс роботи при номінальній потужності плазмової дуги; система охолодження теплонавантажених вуз-

лів повинна забезпечувати надійний і довгочасний тепловідвід при відносно невеликій витраті води; конструкція плазмотрона повинна бути технологічною у виготовленні та складанні, зручна в експлуатації та ремонті; конструкція плазмотрона повинна забезпечувати довгочасну роботу електрода і сопла в середовищі інертних газів, газових сумішах з хімічно активними газами та їх мінімальну витрату на номінальній потужності; матеріали, які використовуються в конструкції плазмотрона, не повинні взаємодіяти з електромагнітними полями і руйнуватися в агресивному високотемпературному газовому середовищі; струмопровідні елементи повинні мати гарантовану електричну ізоляцію; корпус плазмотрона повинен забезпечувати надійний захист електродного вузла від дії пічного середовища, підведення охолоджуваної води до сопла та введення плазмотрона в плавильну камеру через ущільнюючий елемент і дозволяти здійснювати його осьове переміщення під час плавки; на зовнішній частині корпусу, яка входить у плавильний простір печі, повинні бути відсутні будь-які водо-, електро- або газопідвідні рукава; роз'єми, неметалеві ущільнення і деталі, які можуть наражатись на дію випромінювання, повинні мати термостійкі або водоохолоджувані захисні екрани; плазмотрон повинен забезпечувати багаторазове надійне збудження та стабільне горіння дуги в заданому діапазоні робочих струмів та напруги.

Усі перелічені вимоги справедливі і мають вирішальне значення при визначенні конструкції того чи іншого плазмотрона. Підвищення ресурсу роботи дугових металургійних плазмотронів є однією із головних проблем, які стримують їх широке впровадження в промислових масштабах і розвиток плазмової металургії взагалі.

#### Список літератури

1. Финкельбург В., Меккер Г. (1961) *Электрическая дуга и термическая плазма*. Москва, ИЛ.
2. Франк-Каменецкий Д.А. (1970) *Плазма — четвертое состояние вещества*. 4-е изд. Москва, Атомиздат.
3. Сисоян Г.А. (1974) *Электрическая дуга в электрической печи*. 3-е изд. Москва, Металлургия.
4. Никольский Л.Е., Бортничук Н.И., Волохонский Л.А. и др. (1971) *Промышленные установки электродугового нагрева и их параметры*. Москва, Энергия.
5. Дембовски В. (1981) *Плазменная металлургия*. Москва, Металлургия.
6. Лесков Г.И. (1970) *Электрическая сварочная дуга*. Москва, Машиностроение.
7. Ludwig H. (1959) Plasma — energy transfer in gas — shielded welding arcs. *Welding J.*, 38(7), 296–300.
8. Григоренко Г.М., Помарин Ю.М. (1989) *Водород и азот в металлах при плазменной плавке*. Патон Б.Е. (ред.). Киев, Наукова думка.

9. Чередниченко В.С., Аньшаков А.С., Кузьмин М.Г. (2008) *Плазменные электротехнические установки*. Новосибирск, НГТУ.
10. Гаджиев М.Х., Саргсян М.А., Терешонок Д.В., Тюфтяев А.С. (2016) Исследования аргоновой плазмы дугового разряда с катодом из чистого вольфрама. *Прикладная физика*, **4**, 22–26.
11. Хомич В. А. и др. (2010) Моделирование процессов образования атомарного азота в плазме тлеющего разряда в смеси азот–аргон. *Письма в Журнал технической физики*, **36(19)**, 91–99.
12. Походня И.К. (1972) *Газы в сварных швах*. Москва, Машиностроение.
13. Григоренко Г.М. (2003) *Газообменные процессы при плазменной и дуговой плавке металлов. Прогресивні матеріали і технології*: т. 1. Київ, Академперіодика, 102–112.
14. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. (2013) *Плазменные технологии*. Руководство для инженеров. Санкт-Петербург.
15. Маврутенков А.А., Веселовский Н.И. (2011) Влияние подачи плазмообразующего газа на наплавку. *Техника и оборудование для села*, **4**, 44–45.
16. Боровской А.М. (2014) Моделирование течения плазмообразующего газа с учетом его взаимодействия с электрической дугой в каналах высоковольтных плазмотронов переменного тока. *Успехи прикладной физики*, **2(2)**, 105–111.
5. Dembovsky, V. (1981) *Plasma metallurgy*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
6. Leskov, G.I. (1970) *Electric welding arc*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
7. Ludwig, H. (1959) Plasma — energy transfer in gas — shielded welding arcs. *Welding J.*, **38(7)**, 296–300.
8. Grigorenko, G.M., Pomarin, Yu.M. (1989) *Hydrogen and nitrogen in metals during plasma melting*. Ed. by B.E. Paton. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
9. Cherednichenko, V.S., Anshakov, A.S., Kuzmin, M.G. (2008) *Plasma electrotechnical equipment*. Novosibirsk, NGTU [in Russian].
10. Gadzhiev, M.Kh., Sargsyan, M.A., Tereshonok, D.V., Tyufityaev, A.S. (2016) Investigation of argon plasma of arc discharge with pure tungsten cathode. *Prikladnaya Fizika*, **4**, 22–26 [in Russian].
11. Khomich, V.A. et al. (2010) Modeling of processes of atomic nitrogen formation in glow discharge plasma in nitrogen-argon mixture. *Pisma v Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki*, **36(19)**, 91–99 [in Russian].
12. Pokhodnya, I.K. (1972) *Gases in welds*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
13. Grigorenko, G.M. (2003) Gas exchange processes in plasma and arc melting of metals. In: *Advanced materials and technologies*. Vol. 1. Kyiv, Akadempriodyka, 102–112 [in Russian].
14. Sosnin, N.A., Ermakov, S.A., Topolyansky, P.A. (2013) *Plasma technologies: Manual for engineers*. St.-Petersburg [in Russian].
15. Mavrutenkov, A.A., Veselovsky, N.I. (2011) Influence of feeding of plasma-forming gas for surfacing. *Tekhnika i Oborudovanie dlya Sela*, **4**, 44–45 [in Russian].
16. Borovskoy, A.M. (2014) Modeling of plasma-forming gas flow taking into account its interaction with electric arc in channels of high-voltage alternating current plasmatrions. *Uspekhi Prikladnoj Fiziki*, **2(2)**, 105–111 [in Russian].

## References

1. Finkelburg, B., Mekker, G. (1961) *Electric arc and thermal plasma*. Moscow, IL [in Russian].
2. Frank-Kamenetskii, D.A. (1970) *Plasma — the fourth state of matter*. 4-th ed. Moscow, Atomizdat [in Russian].
3. Sisoyan, G.A. (1974) *Electric arc in electric furnace*. 3<sup>rd</sup> Ed. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
4. Nikolsky, L.E., Bortnichuk, N.I., Volokhonskaya, L.A. et al. (1971) *Industrial units of electric arc heating and their parameters*. Moscow, Energiya [in Russian].

## PHYSICAL AND TECHNICAL PREREQUISITES FOR DEVELOPMENT OF METALLURGICAL PLASMATRONS

V.V. Stepanenko, I.V. Sheiko, D.M. Zhirov, T.I. Dubova, V.V. Barabash  
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevyeh Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

The paper considers the physical and technological aspects of creating arc plasmatrions designed to operate in metallurgical smelting units and furnaces. Based on analysis of literature sources, a classification of metallurgical plasmatrions by the principle of plasma gas heating to plasma state is proposed. According to this classification, all the metallurgical plasmatrions are divided into four groups: arc, induction, electron and fuel. It is shown how in each group gas is heated to a plasma state, and the influence of technological factors (gas flow rate and composition, operating current, etc.) on plasma temperature and its technological properties is described. The features of burning of alternating current plasma arcs are considered. The requirements that must be observed, when designing metallurgical plasmatrions, are formulated. Ref. 16, Tabl. 1, Fig. 9.

*Key words: electric arc; plasma arc; plasmatron, plasma temperature; working current, volt-ampere characteristic, temperature gradient, plasma gas*