

## ДУГОВІ МЕТАЛУРГІЙНІ ПЛАЗМОТРОНИ

В.О. Шаповалов

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

Розглянуто проблему ресурсу роботи металургійних плазмотронів. Показано, що площа плями дуги не зростає пропорційно підвищенню струму дуги. Зростання щільності струму у плямі дуги призводить до оплавлення поверхні електрода, на який спирається дуга. Для зниження локального навантаження струмом на електрод запропоновано робити його розщепленим з контрольованим навантаженням струмом на кожний елементарний електрод. Конструкція розщепленого мідного електродного вузла реалізована у лабораторних умовах і показала свою роботоздатність. На деякій відстані від електрода елементарні дуги стягуються у єдиний стовп дуги. Бібліогр. 13, рис. 3.

*Ключові слова:* електрична дуга; приелектродне падіння напруги; плями дуги; електрод; плазмотрон

Один із видів нагріву, який широко застосовується в металургії, є дуговий. Надпотужні дугові печі використовуються для випівки металів, отримання феросплавів тощо. Особливу нішу має плазмово-дуговий нагрів. Поєднання енергії дуги і контрольованої атмосфери з широким діапазоном регулювання тиску і складу атмосфери створює різні металургійні ефекти: рафінування металу від домішок, видалення з металу шкідливих газів, насичення металу газами, наприклад, азотом зверх рівноважних концентрацій та ін. [1].

Основним інструментом плазмово-дугового нагріву є плазмотрон. Від його потужності і ресурсу роботи елементів конструкції залежить реалізація плазмових технологій у промисловості [2, 3]. Як показує практика, зі зростанням потужності ресурс роботи плазмотронів швидко падає. Якщо дугові плавильні плазмотрони невеликої потужності можуть працювати тривалий час, то ресурс роботи окремих вузлів потужних плазмотронів скорочується як мінімум на один порядок (до кількох десятків годин). Крім того робота потужних плазмотронів іноді супроводжується забрудненням металу матеріалами металевого електрода, який у вигляді крапель надходить до ванни з рідким металом. У зв'язку з цим виникає проблема пошуку рішення підвищення ресурсу роботи потужних плазмотронів для плазмово-дугових печей. Елемент конструкції плазмотрона, що визначає ресурс, є електрод, на який спирається пляма дуги. Інші елементи конструкції плазмотрона мають значний ресурс роботи, який практично не залежить від потужності. Тому дослідження проблеми доцільно розпочати з аналізу роботи електродних вузлів, які були реалізовані при створенні плазмотронів.

В історичному плані створення плазмотронів розпочалося з пристроїв невеликої потужності (15...30 кВт). Потужність є результат множення напруги на струм дуги. Падіння напруги на дузі мало впливає на ресурс роботи електрода, на який

спирається дуга. Саме величина струму визначає ресурс. Тому краще оперувати не потужністю, а показниками струму плазмотрона.

Для плазмотронів невеликої потужності значення струму коливалася у межах 150...750 А. Як правило електродний вузол являє собою вольфрамовий електрод діаметром 3...10 мм з ресурсом роботи сотні годин. Але плазмотрони з такими показниками струму мало придатні для створення потужних плазмово-дугових печей, призначених для переплавлення великих об'ємів металу. Необхідні плазмотрони, які могли б генерувати дугу струмом від декількох одиниць до десятків кілоампер.

Науковці і конструктори вирішували задачу дуже просто, без урахування нелінійних характеристик дуги. Якщо один стрижень діаметром до 10 мм стабільно працював у плазмотроні зі струмом дуги 600...750 А, то для генерації дуги зі значно більшим струмом збільшили площу радіального перетину стрижня електрода пропорційно зростанню струму. Як пізніше з'ясувалося на практиці, площа плями, на яку спирається дуга, не зростала пропорційно підвищенню струму. Вона майже не змінилася, а при значному збільшенні струму могла зменшитися за рахунок магнітного стискання дуги, яке зростало з підвищенням струму. При цьому приелектродне падіння напруги мало незначне змінення. Тепло, яке надходило у електрод через пляму дуги, визначалося як множення значень струму на приелектродне падіння напруги. Тому зі збільшенням струму значно зростала його локальна щільність через електрод і питома величина теплового потоку. При перевищенні критичного значення питомої величини теплового потоку електрод починав локально оплаватися, утворювалися краплі, які потрапляли до ванни з рідким металом. Електроди традиційно виготовлялися наборними з декілька стрижнів. На рис. 1 наведено електродний вузол плазмотрона на початку процесу, де видно автографи дуги і оплавлення електрода. Такий електрод при струмі 2,5...2,8 кА мав ресурс роботи 25...30 год.

В.О. Шаповалов — <https://orcid.org/0000-0003-1339-3088>

© В.О. Шаповалов, 2020

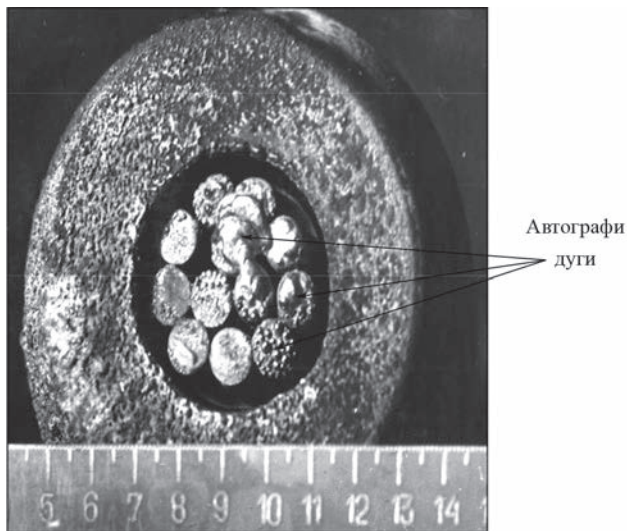


Рис. 1. Загальний вигляд електродного вузла плазмотрона після 20 хв роботи: діаметри вольфрамових електродів 10 мм

Основна причина, що призводила до розплавлення електрода була, як вбачали дослідники, у контрагуванні плями дуги. Тому для усунення цього явища було висунуто декілька пропозицій: робота плазмотрона у розрідженій атмосфері та організація додаткової малопотужної плазмової дуги для розігрівання основного електрода і, таким чином, створення у приелектродній області дуги умов для переходу дуги у дифузний режим з суттєвим збільшенням площі плями [4]. Прогнозувалося, що при цьому знизиться питома щільність струму у електроді. Але сподівання виявилися дещо перебільшеними. Пляма дуги практично не збільшилася, додатковий нагрів електрода відбувся. Таким чином, підвищити ресурс роботи електродного вузла не вдалося. Дослідження і експерименти проводилися на гарячих катодах, коли електрод генерував необхідну кількість електронів, які забезпечували стабільне горіння дуги.

Оскільки тепловиділення на електроді залежало від двох параметрів — струму і приелектродного падіння напруги, то наступним кроком було випробування способів зменшення цього падіння при незмінних значеннях струму. Був винайдений спосіб введення в електрод лужних і лужноземельних елементів, які в процесі роботи при нагріванні електрода забезпечували низьку роботу виходу. Було розроблено тверді електроди з добавками цих елементів (торирований або лантанований вольфрам) [5] і електроди фітільного типу, коли вздовж вісі електрода вмонтовувався фітіль, просочений сполуками лугів, які забезпечували низьку роботу виходу електронів.

Були випробувані інші способи підвищення ресурсу роботи гарячих електродів, наприклад електродів з перехідних металів (окису або нітриду гафнію, цирконію тощо), що працюють у повітряному середовищі [6–8]. Для струму 100...250 А

такі катоди працювали успішно, особливо у пристроях для повітряного різання металів дугою.

Іншим напрямком робіт з підвищення ресурсу електродного вузла у 70–80-х рр. минулого століття було використання холодних електродів на основі міді. Електрод, на який спиралася дуга, виконував роль анода. Переміщення плями дуги по робочій поверхні електрода забезпечувалося примусово під дією електромагнітного поля або за допомогою газових вихрового впливу. Попередніми роботами у цьому напрямку були роботи зі створення невитратних електродів для переплаву титану фірмами «Дюрерк» і «Ротройд» [9, 10], а також невитратних електродів, що розробляли в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. Робочий струм дуги досягав декількох кілоампер. Однак при всіх позитивних ефектах, що були отримані, ці генератори дуги не знайшли широкого впровадження у промисловості.

Принцип генерації дуги з невитратним мідним електродом у теперішній час знайшов своє відображення при розробці потужних металургійних плазмотронів. Мідний електрод мав вигляд глухондонної гільзи. Робочою була внутрішня циліндрична поверхня, по якій переміщалося пляма дуги з великою швидкістю. Переміщення дуги здійснювалося з використанням вихрового ефекту газового потоку. Були досягнуті деякі позитивні результати: мале засмічення сплавів матеріалом електрода (на рівні електроперенесення) та більш-менш прийнятний ресурс роботи на рівні 70...80 год. Але ресурс роботи був не гарантований і електрод в результаті точкового впливу дуги прогорав і вода надходила у плавильний простір. Найбільш імовірно, що при циклічному впливі високоінтенсивних теплових навантажень на матеріал електрода, які характерні для плями дуги, у поверхневому шарі міді відбувалися структурні зміни, які разом із скритими дефектами призводили до проплавлення мідного електрода.

Принципово іншим напрямком підвищення ресурсу електродів плазмотрона (дугових нагрівачів) є застосування розщеплених електродів [11]. Створення потужних генераторів дугової плазми з великими показниками струму необхідно не тільки в металургії, але і в інших галузях, наприклад, для випробування елементів космічної техніки. Значення струму таких генераторів плазми сягає десятки кілоампер. Робота плазмового генератора будується таким чином, що пляма дуги, яка б мала бути при роботі одного електрода, примусово розподіляється на окремі плями, показники струму через які зменшуються пропорційно кількості електродів і становлять декілька сотень ампер [12, 13]. При цьому інтенсивність впливу локального теплового потоку на електрод не перевищує критичне зна-

чення і електрод за рахунок цього має підвищений ресурс роботи. Немає залежності теплового впливу від зовнішніх чинників, як це відбувається при газодинамічному або електромагнітному переміщенню плями дуги. Кожен електрод працює стабільно і має своє навантаження, яке регулюється окремим джерелом живлення. Відбувається генерація окремих дуг, які під дією електромагнітних сил, що утворюються струмом кожної дуги, стягуються і формують один потужний стовп дуги. Тобто один потужний стовп дуги гарантовано спирається на окремі електроди, не перевищуючи критичного значення струму через один електрод.

Із проведеного аналізу витікає, що гарантований ресурс роботи плазмотрона може бути отриманий при застосуванні розщеплених електродів, на які спирається дуга.

**Матеріали і методи створення потужних металургійних плазмотронів.** Металургійні плазмотрони можуть бути з гарячим і холодним електродами, на які опирається дуга. Як показала практика, у якості гарячого електрода найчастіше застосовують ітріований або лантанірований вольфрам. Матеріал холодного електрода — мідь. Матеріал для гарячих катодів добре вивчено і накопичено багатий досвід щодо використання вольфраму у плазмотронах невеликої потужності (750 А — струм, який не слід перевищувати). Прийнятний ресурс роботи вольфрамового катода досягається при струмі 500...600 А. Виходячи з цього, доцільно конструювати потужні плазмотрони з розщепленим катодом, які б могли забезпечувати бажаний ресурс роботи.

З міддю ситуація інша. Мідні електроди використовуються у різних пристроях зварювальної техніки, але сталої інформації щодо навантажень струмом, які стосуються роботи міді у режимі електрода дугового плазмотрона, немає. Тому доцільно провести дослідження стійкості мідних електродів в залежності від показників струму дуги.

Матеріал, що використовується для виготовлення електродів, — мідь марки М1, плазмовоутворюючий газ — аргон марки А. Охолоджують мідь водою. Вимушена конвекція газу не передбачається. Випробування проводили у камері, наповненій аргоном. Порядок проведення дослідів був наступний. У тигель завантажували брукт вольфрамових електродів, вертикально по вісі тиглю на відстані 30...35 мм від вольфрамового брукту розміщали мідний водоохолоджуваний електрод діаметром 25...30 мм, торець якого мав сферичну форму. Електричне живлення дугового проміжку здійснювали від джерела постійного струму з крутопадаючою характеристикою і приєднанням мідного електрода до його плюсового контакту. Крім того,

для збудження дуги використовували допоміжний електрод і осцилятор високовольтних імпульсів.

Дослідження ресурсу роботи мідного електрода проводили протягом тривалого часу при заданих значеннях струму, а витрати міді визначали періодично шляхом вимірювання зміни маси електрода із застосуванням вагів.

Крім визначення витратних коефіцієнтів матеріалу електродів під дією струму найважливішим є питання створення конструкції плазмотрону з розщепленим електродним вузлом. Для цього передбачалося випробувати два різні режими живлення індивідуальних обособлених електродів — безперервний і імпульсний. Для безперервного живлення кожний елементарний електрод мав індивідуальне джерело постійного струму, що забезпечувало стабільне горіння елементарних дуг, які об'єднувалися у один стовп дуги на відстані, рівній 1,0...1,5 діаметра кола розпаду елементарних електродів.

Застосування імпульсного режиму роботи елементарних електродних вузлів передбачало неодноразову роботу всіх електродів і формування єдиного стовпа дуги.

**Результати досліджень.** В експериментах досліджувалися мідні електроди. Пляма дуги на електроді під час проведення дослідів була стабільна для кожного значення струму. Вона практично не переміщувалася по поверхні електрода. Мідний електрод поступово втрачав масу у зоні «прив'язки» плями дуги. Можливі різні механізми зниження маси електрода. На нашу думку, є два найбільш вірогідні процеси — випаровування міді у анодній плямі і електроперенос металу під дією електричного струму. В залежності від часу з початку випробування електрода один процес поступово почав превалювати над іншим. На початку випробувань товщина мідної стінки максимальна (20 мм) і визначається конструкцією електрода (рис. 2). Можна припустити, що температура поверхні в робочому стані у зоні плями дуги відповідає діапазону температур плавлення (випаровування). Електрод втрачає масу як за рахунок електроперенесення, так і випаровування. Поступово товщина мідного електрода у зоні дії дуги зменшується, охолодження зони плями дуги підсилюється. В результаті інтенсивність випаровування поступово зменшується, а товщина стінки зменшується більш повільно. Настає режим мінімальної витрати матеріалу електрода, що відповідає його товщині стінки 10 мм. На нашу думку, у цьому випадку основним механізмом стає електроперенесення. Подальше зменшення товщини стінки сприяє зменшенню відтоку тепла в тіло електрода, відбувається перегрів поверхні в зоні плями дуги і втрата маси електрода збільшується. Крім того більш інтенсивно відбувається деграда-



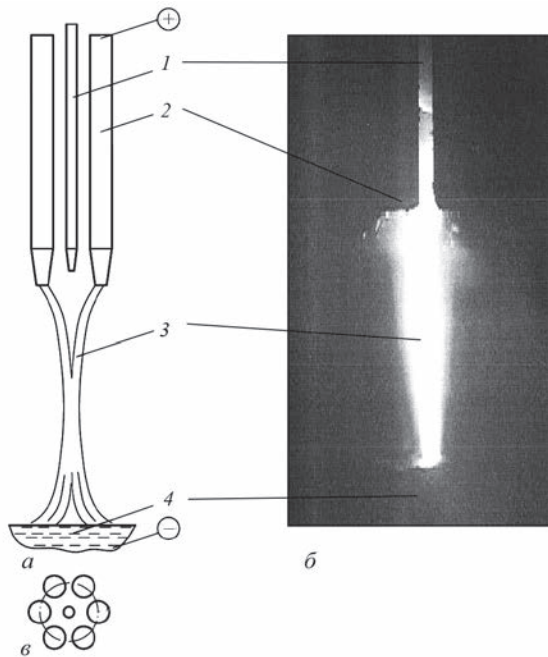


Рис. 2. Схема мідного електродного вузла (а), фото згенерованої дуги (б), розміщення (вид зверху) мідних електродів по колу (в): 1 — вольфрамовий електрод для старту процесу (підпалу дуги); 2 — мідний електрод; 3 — електрична дуга; 4 — рідкий метал

ція структури мідного електрода у зоні плями дуги. Можуть виникати тріщини і проявляються скриті дефекти, що з часом сприяє виходу електрода з ладу. В результаті експериментів встановлено, що при струмі через електрод 400 А час його роботи до руйнування не перевищує 80 год. Для струму

250 А час роботи може становити 220...250 год, а при струмі 150 А — більше 300.

Проведені випробування доповнюють інформацію про ресурс роботи мідних електродів та дозволяють створювати плазмотрони з розщепленим електродом, на який спирається пляма дуги. Були випробувані макети плазмотронів з вольфрамовим і мідним розщепленими електродом. Крім того для полегшення стартового періоду в середині розщепленого мідного електрода був вмонтований елементарний вольфрамовий електрод, на який подавали потенціал мінус. Схематично електродні вузли і фото процесу генерації дуги представлені на рис. 2.

Випробування плазмотрона з розщепленим вольфрамовим електродом показало, що всі елементарні катоди працюють. Елементарні дуги стягуються і утворюють один стовп, тепло якого обігріває металеву ванну і плавить шихтову заготовку. У той же час з'ясувалися деякі негативні процеси, що відбуваються у робочій зоні катодного вузла. Елементарні вольфрамові електроди розжарюються в процесі роботи. Зона навколо такого елементарного електрода іонізується. З'являється можливість перекидання елементарної дуги з одного катода на інший через бічну поверхню і тоді вже з того електрода тече струм подвійної сили і це призводить до його руйнування. Аналогічна ситуація виникає і при використанні мідних електродів (перескокування дуги і подвійне значення струму з одного елементарного електрода).

Таке явище можна усунути двома шляхами: поставити між елементарними електродомі ізолювані водоохолоджувані перегородки; ліквідувати шляхом застосування особливого режиму роботи елементарних електродів.

Другий шлях має більше переваг. Головна з них — немає необхідності змінювати (ускладнювати) конструкцію електродного вузла. Суть розробленої такої системи живлення елементарних електродів полягає в тому, що кількість елементарних електродів повинна бути кратною трьом, але не менше шести. У кожний момент часу працюють тільки два (для шестиелектродного вузла) або три (для дев'ятиелектродного) електрода. Діючий струм, який може призвести до руйнування електрода не перевищує критичне значення. Електроди, через які тече струм, знаходяться завжди один проти одного (для шестиелектродної схеми). Миттєва потужність струму стягує два струми в один стовп дуги, який постійно живиться від чергової пари електродів. Почергово працюють електроди (рис. 3) 1-Е1 і 2-Е1, 1-Е2 і 2-Е2 та 1-Е3 і 2-Е3. Діюче значення струму показують амперметри, що включені у токопровід кожного електрода.

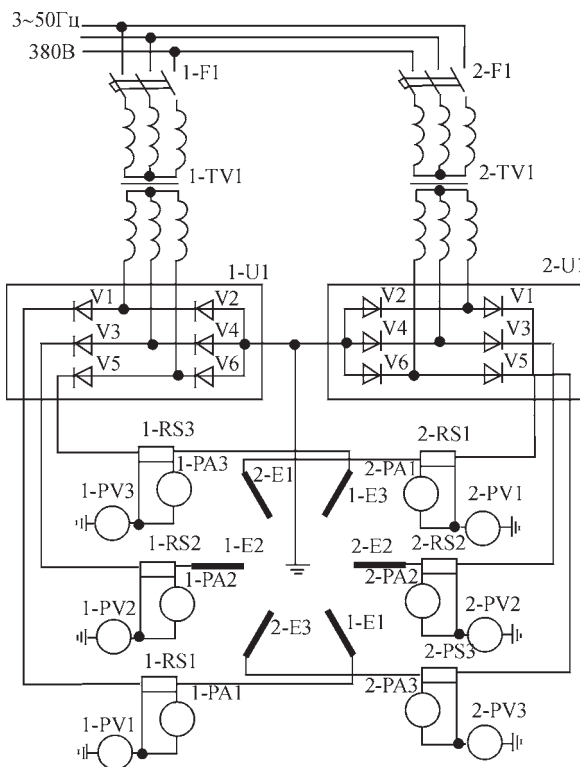


Рис. 3. Електрична схема живлення електродів електродного вузла плазмотрона

Струм стовпа дуги у цьому випадку дорівнює сумі струмів усіх елементарних електродів.

Дослідження з визначення ресурсу роботи плазмотронів, побудованих за схемою підсумовування струму елементарних електродів, тривають. Але є головне — гіпотеза, за якою створена експериментальна конструкція плазмотрону, вже працює.

## Висновки

1. Показано, що плазмотрони з одним електродом не забезпечують гарантований ресурс роботи.

2. Обґрунтовано, що вирішення проблеми є в створенні плазмотронів з розщепленим електродним вузлом, які мають забезпечити необхідний ресурс роботи.

## Список літератури

1. Лакомский В.И. (1974) *Плазменно-дуговой переплав*. Киев, Техніка.
2. Кривцов В.С., Планковский С.И. (2005) Проблемы создания высокоресурсных сильноточных электродуговых плазмотронов. *Аэрокосмическая техника и технология*, **7**, 7–20.
3. Шаповалов В.А., Цыкуленко К.А., Шейко И. В., Колесниченко В.И. (2010) Плазменная металлургия и ресурс работы плазмотронов. *Современная электрометаллургия*, **4**, 20–25.
4. Замуло Н.И., Лагаш Ю.В., Забарилло О.С. и др. (1989) Эрозионная стойкость электродов металлургических плазмотронов. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **2**, 76–83.
5. Богаченко А.Г., Мищенко Д.Д., Брагинцев В.И. и др. (2016) Экономия электроэнергии на дуговых сталеплавильных печах постоянного тока с графитированными фитильными электродами. *Современная электрометаллургия*, **1**, 58–64.
6. Лакомский В.И. (2000) Плазменно-дуговая горелка с оксидным катодом. *Автоматическая сварка*, **12**, 71–75.
7. Аньшаков А.С., Урбах Э.К., Урбах А.Э., Фалеев В.А. (2005) Исследование термохимических катодов в дуговых плазмотронах. *Теплофизика и аэромеханика*, **12(4)**, 685–691.
8. Лакомський В.Й. (2006) Оксидний катод зварювальної дуги. *Фізика і хімія твердого тіла*, **2**, 326–330.
9. Iowly J.D. (1972) Four de fusion a electrode non consumable rotatroude. *Vide*, **161(27)**, 262.
10. Vaia, A., Akers, R. (1973) Durarc process for melting and casting titanium. *Titanium Soc. and Technol.*, **1**, 331–341.
11. Шаповалов В.А., Лагаш Ю.В. (1999) Металлургические плазмотроны. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **4**, 50–56.
12. Жадкевич М.Л., Шаповалов В. А., Мельник Г.А. и др. (2005) Дуговые источники нагрева с нерасходуемыми электродами. *Современная электрометаллургия*, **4**, 29–33.
13. Шаповалов В. А., Мельник Г.А., Вислобоков О.М. и др. (2006) Экспериментальное исследование эрозии медного водоохлаждаемого анода. *Там же*, **1**, 17–19.

## References

1. Lakomsky, V.I. (1974) *Plasma-arc remelting*. Kiev, Tekhnika [in Russian].
2. Krivtsov, V.S., Plankovsky, S.I. (2005) Problems of creation of high performance high-current electric arc plasmotrons. *Aerokosmicheskaya Tekhnika i Tekhnologiya*, **7**, 7–20 [in Russian].
3. Shapovalov, V.A., Tsykulenko, K.A., Sheiko, I.V., Kolesnichenko, V.I. (2010) Plasma metallurgy and service life of plasmotrons. *Sovrem. Elektrometall.*, **4**, 20–25 [in Russian].
4. Zamulo, N.I., Latash, Yu.V., Zabarilo, O.S. et al. (1989) Erosion resistance of electrodes of metallurgical plasmotrons. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **2**, 76–83 [in Russian].
5. Bogachenko, A.G., Mishchenko, D.D., Braginets, V.I. et al. (2016) Saving of electric power at the arc steel melting furnaces of direct current with graphitized cored electrodes. *Sovrem. Elektrometall.*, **12(1)**, 58–64 [in Russian].
6. Lakomsky, V.I. (2000) Plasma arc torch with an oxide cathode. *The Paton Welding J.*, **12**, 71–75.
7. Anshakov, A.S., Urbakh, E.K., Urbakh, A.E., Faleev, V.A. (2005) Study of thermochemical cathodes in arc plasmotrons. *Teplofizika i Aeromekhanika*, **12(4)**, 685–691 [in Russian].
8. Lakomskyi, V.Yo. (2006) Oxide cathode of welding arc. *Fizyka i Khimiya Tverdogo Tila*, **2**, 326–330 [in Ukrainian].
9. Iowly, J.D. (1972) Four de fusion a electrode non consumable rotatroude. *Vide*, **161(27)**, 262 [in French].
10. Vaia, A., Akers, R. (1973) Durarc process for melting and casting titanium. *Titanium Soc. and Technol.*, **1**, 331–341.
11. Shapovalov, V.A., Latash, Yu.V. (1999) Metallurgical plasmotrons. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **4**, 50–56 [in Russian].
12. Zhadkevich, M.L., Shapovalov, V.A., Melnik, G.A. et al. (2005) Arc heat sources with nonconsumable electrodes. *Advances in Electrometallurgy*, **4**, 25–28.
13. Shapovalov, V.A., Melnik, G.A., Vislobokov, O.M. et al. (2006) Experimental investigation of erosion of copper water-cooled anodes. *Ibid.*, **1**, 14–16.

## METALLURGICAL ARC PLASMATRONS

V.O. Shapovalov

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

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

The problem of the service life of metallurgical plasmotrons is considered. It is shown that the area of the arc spot does not increase in proportion to the increase in the arc current. Increasing the current density in the arc spot leads to melting of the surface of the electrode on which the arc rests. To reduce the local current load on the electrode, it is proposed to make the electrode on which the arc rests split with controlled current load on each elementary electrode. The design of the split copper electrode assembly was implemented in the laboratory and has shown its efficiency. At some distance from the electrode, the elementary arcs are contracted into a single arc column. Ref. 13, Fig. 3.

*Key words:* electric arc; near-electrode voltage drop; arc spots; plasmatron electrode

Надійшла до редакції 30.11.2020