

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 669:539.43:539.56

І. О. ВАКУЛЕНКО<sup>1\*</sup>, С. О. ПЛІТЧЕНКО<sup>2</sup>, Д. М. МАКАРЕВИЧ<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Технологія матеріалів», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта dnuzt\_texmat@ukr.net, ORCID 0000-0002-7353-1916

<sup>2</sup>Каф. «Технологія матеріалів», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта dnuzt\_texmat@ukr.net, ORCID 0000-0002-0613-2544

<sup>3</sup>Каф. «Технологія матеріалів», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта dnuzt\_texmat@ukr.net, ORCID 0000-0003-4327-9809

### ВПЛИВ ХІМІЧНИХ СПОЛУК НА ФОРМУВАННЯ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО РОЗРЯДУ

**Мета.** Метою роботи являється порівняльний аналіз впливу хімічних сполук на процес запалювання електричної дуги, умови її горіння. **Методика.** Матеріалом для електроду послуговував низьковуглецевий дріт діаметром 3 мм зі сталі з 0,15 % вуглецю. В якості речовин, що визначають умови формування електродугового розряду, були використані каолін;  $CaCO_3$  з домішками гіпсу до 60 %;  $SiO_2$  та  $Fe - Si$  при концентрації заліза до 50 %. Дослідження проводилися при використанні електричного струму постійного напрямку, дуги зворотної полярності. В якості джерела електричного струму було використано зварювальний перетворювач типу ПСО-500. На спеціальному стенді початковий зазор між електродом та металеву пластину складав значення 1–1,5 мм. Міжелектродний проміжок заповнювали досліджуваною сполукою та формували електричний розряд. У момент запалювання електричної дуги визначали величини електричного струму та напруги на дузі. Після природнього розриву електричної дуги, остаточну величину зазору між електродами приймали в якості максимальної довжини дуги. **Результати.** За умов експерименту перенос металу в міжелектродному проміжку відповідав краплинному механізму. За зовнішніми ознаками співвідношення між максимальною довжиною дуги та потужністю електричного струму має вигляд експоненціальної залежності. Питома потужність електричного дугового розряду в момент запалення дуги на одиницю її довжини відображає стан середовища в міжелектродному проміжку. **Наукова новизна.** 1. На основі аналізу впливу досліджуваних речовин на процеси формування електричного дугового розряду визначено обернено пропорційний зв'язок між потужністю електричного струму та максимальною довжиною дуги до моменту її природнього розриву. 2. Співвідношення між максимальною довжиною дуги та потужністю електричного струму з достатньо високим коефіцієнтом кореляції підпорядковуються експоненціальній залежності. Вплив досліджуваних речовин на процес формування електричного дугового розряду визначається через показники ступеня розглянутого співвідношення. 3. Величина питомої потужності електричного струму в момент формування електричного розряду на одиницю довжини дуги може бути прийнята в якості параметра, що характеризує стан міжелектродного середовища. **Практична значимість.** За умов однакової установочної сили електричного струму визначено послідовність розташування досліджуваних сполук у порядку збільшення їх впливу на процес горіння дуги. Мінімальний вплив спостерігається з боку каоліну, а максимальний – з  $Fe - Si$ .

**Ключові слова:** електричний дугувий розряд; довжина дуги; потужність електричного струму; хімічна сполука

## Вступ

Для технології електричного дугового зварювання, початкові умови формування електричного розряду значною мірою визначають особливості подальшого процесу горіння дуги. Зважаючи на велику кількість чинників, що за якісними показниками по-різному впливають на умови запалювання електричної дуги, стан середовища міжелектродного проміжку є одним із найбільш вагомим [3].

З іншого боку, стан середовища буде набувати не менш вагomeго значення і на етапі стабільного горіння дуги, визначаючи умови переносу металу через електродний проміжок. Більше того, сам характер переносу рідкого металу від електрода до зварювальної ванни буде зумовлювати не тільки технологічні характеристики електричної дуги і енергетичний баланс, але і ступінь завершення розвитку металургійних процесів під час формування зварного з'єднання в цілому [3, 12]. Враховуючи, що вплив міжелектродного середовища на процес запалювання дуги визначається іонізуючою спроможністю, розташування між електродами різних речовин і сполук дозволить змінювати початкові умови формування електричного розряду [4, 15]. На підставі цього, цілеспрямований вплив на умови переносу металу на момент формування електричного розряду має дуже велике значення для технології електричного дугового зварювання.

Процес перенесення металу через міжелектродний проміжок значною мірою визначається початковими умовами запалювання електричної дуги. Вказаний процес переносу металу можна умовно розподілити на окремі етапи, яким притаманні характерні умови зміни агрегатного стану металу і його властивостей [2, 6]. Так, після формування рідини, зростання її об'єму на поверхні катоду до моменту відокремлення краплин з поверхні і перенесення їх до аноду.

Враховуючи залежність процесу формування краплин, їх форми і розміру від протікання хімічних реакцій між речовинами або сполуками, що заповнюють міжелектродний проміжок, сумарний вплив на іонізуючу спроможність середовища передбачити достатньо складно [8, 10]. З іншого боку, процес формування краплини можна з впевненістю вважати залежним від співвідношення сил тяжіння, що впливають на рідину, і силою поверхневого натягу металу.

Величина сили поверхневого натягу рідкого металу або сплаву визначається особливостями їх внутрішньої будови, до яких відносяться тип кристалічної решітки, хімічний склад сплаву. Температура нагріву рідини та її рідкоплинність має певний вплив на указану характеристику.

Так, для заліза коефіцієнт поверхневого натягу дорівнює 1,22 Н/м [6]. Домішки хімічних елементів до заліза призводять до його зміни. Наприклад, добавка до заліза 18 % Cr, 8 % Ni, 1 % Ti (X18H9T) призводить до зменшення коефіцієнта поверхневого натягу ( $\sigma$ ) на рівні 8–10 %.

Порівняно з впливом хімічного складу сплаву суміш газів міжелектродного проміжку може також впливати на рівень значень  $\sigma$ , хоча їх вплив у більшості випадків якісно різний.

Розглядаючи формування краплини металу електрода можна зазначити, що основний вплив визначається співвідношенням між аксіальною силою, яка виникає внаслідок так званого «пінч-ефекту» та силою поверхневого натягу [4, 6]. Зростання температури нагріву рідкого металу супроводжується зниженням коефіцієнта поверхневого натягу [6, 9].

Враховуючи, що в першому наближенні температура розігріву рідкого металу пропорційна силі зварювального струму ( $I$ ), а зростання  $I$ , змінюючи вплив гравітаційної складової, сприяє зменшенню критичного розміру краплини (умови відриву краплини від електрода) [6]. Одночасно з цим збільшується вплив електромагнітної сили [1], в тому числі його стискаюча дія на рідкий метал зварювальної ванни [1, 14]. Після відриву краплини від поверхні електрода, процес її переміщення вже починає залежати від сумісної дії електростатичних та електродинамічних сил, реактивної дії електричного розряду [10].

На підставі наведеного сумісного впливу, зростання сили електричного струму супроводжується подрібненням краплин рідкого металу, які переносяться в міжелектродному проміжку [6, 16]. Наведений складний вплив на процес переносу рідкого металу під час електродугового зварювання може корегуватися за рахунок використання різноманітних хімічних речовин і сполук.

## Мета

Порівняльний аналіз впливу хімічних речовин на процес запалювання електричної дуги і умови її горіння.

### Методика

Матеріалом для електрода був використаний низьковуглецевий дріт діаметром 3 мм, з сталі з 0,15 % вуглецю. Як сполуки, що визначають умови формування електродугового розряду, були використані каолін;  $CaCO_3$ , з домішками гіпсу до 60 %;  $SiO_2$  та  $Fe-Si$ ; при концентрації заліза до 50 %.

Дослідження виконували під час використання електричного струму постійного напрямку, дуги зворотної полярності. Як джерело електричного струму використовували зварювальний перетворювач типу ПСО-500. На спеціальному стенді початковий зазор між електродами та металевою пластиною складав значення 1–1,5 мм. Міжелектродний проміжок заповнювали досліджуваною сполукою і формували електричний розряд.

В момент запалювання електричної дуги визначали величини електричного струму та напруги на дузі. Після природного розриву електричної дуги, остаточну величину зазору між електродами приймали як максимальну довжину дуги.

### Результати

Окрім залежності температури розігріву металу від сили електричного струму [7, 10], процес формування краплин рідкого металу визначається сумісною дією декількох чинників. По-перше, існування обернено пропорційного співвідношення між температурою нагріву і силою поверхневого натягу металу показує, що зростання  $I$  буде сприяти підвищенню рідкоплинності рідини. Одночасно з цим, спостерігається зростання електродинамічного впливу на процес утворення краплин. Сумісний вплив указаних чинників призводить до зростання ступеня диспергування краплин рідкого металу [6].

Процес переносу рідкого металу через міжелектродний проміжок можна розкласти на послідовні етапи: відрив сформованої краплини від поверхні одного електрода і перенос її до іншого. Таким чином, пропорційно зростанню  $I$  буде зменшуватися розмір краплин, що вилучаються з поверхні електрода. Одночасно буде зростати кількість краплин, що переносяться через проміжок між електродами за одиницю часу.

При силі електричного струму, коли краплини утворюють безперервний ланцюг, вважається досягненням критичних умов, що визначають якісні зміни в характері переносу металу (від краплинного до струйного). Таким чином, визначення механізму переносу металу має практичне значення для оцінювання впливу досліджуваних речовин на процес формування електричного розряду.

Критичне значення електричного струму ( $I_c$ ) відповідає умовам, коли діаметр стовбура рідкого металу досягне приблизно 0,7 діаметра електрода [6]. На підставі цього, величина  $I_c$  оцінюється за співвідношенням:

$$I_c = k\sqrt{\sigma d}, \quad (1)$$

де  $k$  і  $\sigma$  – коефіцієнти пропорційності і поверхневого натягу металу відповідно,  $d$  – діаметр електрода.

Невизначеність величин  $k$  і  $\sigma$  може бути усунена використанням відомих експериментальних даних. Так, величина сили поверхневого натягу для заліза дорівнює 1,22 Н/м, а при збільшенні вмісту хімічних елементів зменшується, досягаючи, наприклад, для складно легованої сталі марки X18H9T 1,1 Н/м [6]. Підставляючи в (1)  $\sigma = 1,1$  Н/м, для різних діаметрів електрода: 1–3 мм та відповідних значень  $I_c$  (190–350 А), які отримані з прямих досліджень (по відриву краплини рідкого металу від поверхні електрода), для сталі X18H9T величина  $k$  склала значення 18,1–18,8 А/дін<sup>0,5</sup>.

З урахуванням інтервалу зміни  $\sigma$ , для низьковуглецевої сталі можна прийняти  $\sigma = 1,2$  Н/м, та  $k = 18,5$  А/дін<sup>0,5</sup>. За співвідношенням (1) було визначено, що для низьковуглецевої сталі електрода при  $d = 3$  мм,  $I_c$  повинно дорівнювати 375–380 А. Порівнюючи із струмом установки 200 А, слід вважати, що за умов експерименту перенос металу в міжелектродному проміжку відповідав краплинному механізму.

За умов електричного струму постійного напрямку, при зворотній полярності, відсутність кореляційних зв'язків між максимальною довжиною дуги ( $l_0$ ) і силою електричного струму або напругою на дузі ( $U$ ), виявлена необхідність одночасного урахування впливів від  $I$  та  $U$ . Результати побудованих залежностей для досліджуваних компонентів наведені на рис. 1.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

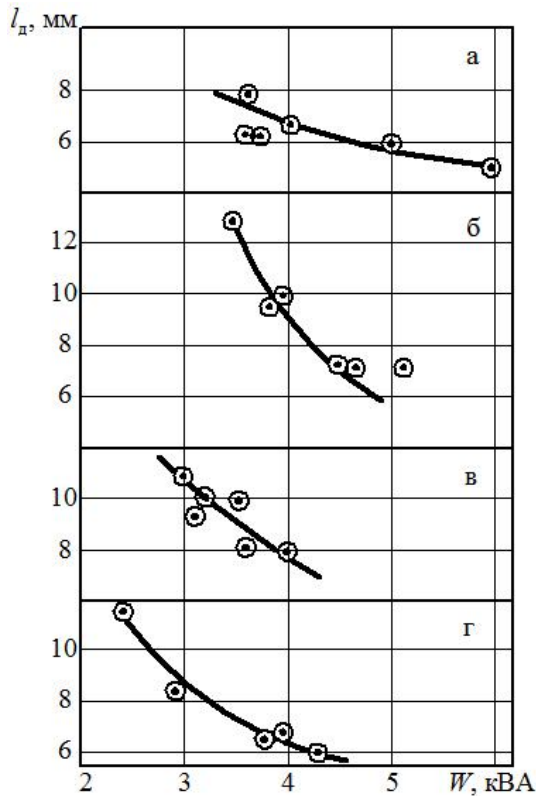


Рис. 1. Вплив каоліну – (а),  $SiO_2$  – (б),  $Fe-Si$  – (в) та  $CaCO_3$  – (г) на співвідношення між довжиною дуги і потужністю електричного струму

Fig. 1. Influence of kaolin – (a),  $SiO_2$  – (b),  $Fe-Si$  – (c) and  $CaCO_3$  – (d) on the ratio between the arc length and electric current power

За зовнішніми ознаками можна говорити про існування обернено пропорційного співвідношення між  $l_0$  і потужністю електричного струму ( $W = UI$ ). Відхилення залежностей  $l_0 = f(W)$  від прямолінійного вигляду вказує на необхідність перебудови їх у логарифмічних координатах (рис. 2).

У першому наближенні вказані залежності достатньо однозначно підпорядковуються співвідношенню типу:

$$\ln(l_0) = A + K \ln(W), \quad (2)$$

де  $A$  і  $K$  постійні характеристики. Після перетворень вираз (2) набуває вигляду:

$$l_0 \approx B \frac{e^A}{W^K}, \quad (3)$$

де  $B$  – коефіцієнт пропорційності.

Для кожного досліджуваного компонента за залежностями (рис. 2) були визначені значення  $A$  і  $K$ , для розмірності  $l_0$  [мм],  $W$  [кВА]. Так, в порядку зменшення величин  $A$  (14,75; 13,7; 10,5 і 8,8), досліджувані компоненти розташовуються у відповідній послідовності:  $SiO_2$ ,  $Fe-Si$ ,  $CaCO_3$  і каолін. Аналогічний характер зміни спостерігається і для величини  $K$ , у визначеній послідовності ( $SiO_2$ ,  $Fe-Si$ ,  $CaCO_3$  і каолін): 1,5; 1,4; 1,03 і 0,817.

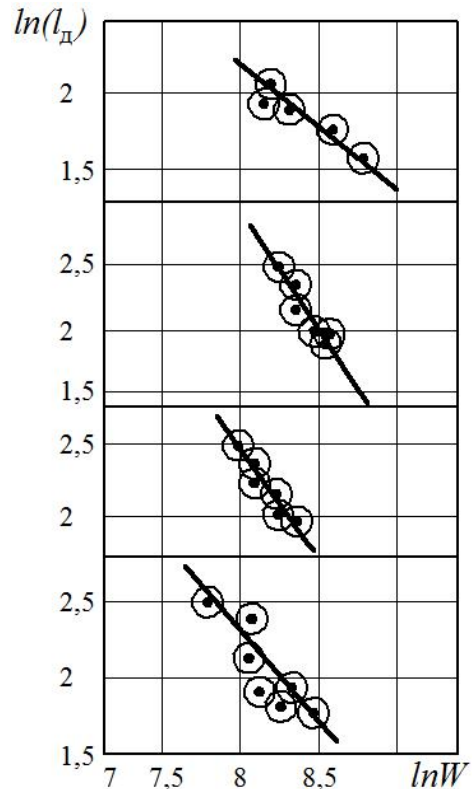


Рис. 2. Залежності  $l_0 = f(W)$  для досліджуваних речовин в логарифмічних координатах. Позначення аналогічні рис. 1

Fig. 2. Dependencies  $l_0 = f(W)$  for the studied substances in logarithmic coordinates. Values are similar to the Fig. 1

Для більш детального пояснення причин, що впливають на процес запалювання електричної дуги компонентів в наведеній послідовності від  $SiO_2$  до каоліну, здійснено додатковий аналіз отриманих співвідношень. Так у першому наближенні, з урахуванням відомого зниження сили поверхневого натягу заліза від концентрації кисню [6], наведений характер впли-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

ву (рис. 1) може бути зумовлений присутністю різної концентрації атомів кисню в результаті реакції дисоціації досліджуваних компонентів. З іншого боку, на початкових етапах формування дугового розряду збільшення сили електричного струму супроводжується пропорційним зростанням масопереносу металу через міжелектродний проміжок [5, 10]. Разом з тим, за рахунок сумарної дії виникаючих електричних і магнітних полів в проміжку між електродами формується осьова сила, що визначає механічний характер впливу на рідкий метал. Виникаюче напруження за своєю дією є напруженням тиску.

За умов незмінності більшості чинників, що мають вплив на процес формування дугового розряду, вказане напруження можна оцінити через виникаючу силу ( $\rho$ ) за залежністю [6]:

$$\rho = k_0 I^2, \quad (4)$$

де  $k_0$  – коефіцієнт, що визначає вплив діаметра електрода та полярності електричної дуги. Разом з тим, за наведеною залежністю повністю відсутній вплив іонізуючої спроможності міжелектродного середовища. Хоча, за зображенням співвідношень  $l_0 = f(W)$  (рис. 1) можна все ж визначити особливості впливу досліджуваних речовин на стан середовища міжелектродного проміжку.

Використовуючи потужність електричного дугового розряду в момент запалення дуги як характеристику, що визначає умови подальшого її горіння, максимальна довжина дуги повинна відображати стан середовища в міжелектродному проміжку. Дійсно, аналіз залежностей  $l_0 = f(W)$  показує, що достатньо часто можна спостерігати для однакових рівнів  $W$  зміну  $l_0$  у визначеному інтервалі значень. З метою спроби визначення показника, який може дозволити оцінити вплив досліджуваних речовин на процес горіння дуги, скористаємося залежністю  $l_0 = f(W)$  (рис. 1), але як аргумент приймемо величину  $l_0$ . Далі, після апроксимації залежності  $W = f(l_0)$  прямими лініями і визначення кутового коефіцієнта співвідношень стає можливим оцінити ступінь впливу досліджуваних речовин.

Для інтервалу значень  $W$  і  $l_0$  (рис. 1) кутовий коефіцієнт ( $C$ ) оцінемо за співвідношенням:

$$C = \frac{\Delta W}{\Delta l_0}, \quad (5)$$

де –  $\Delta W$  і  $\Delta l_0$  відповідні інтервали зміни  $W$  і  $l_0$ .

Враховуючи, що кожному хімічному елементу відповідають власні значення потенціалів іонізації (перший потенціал іонізації, другий та ін. [13]), можна з визначеним ступенем спрощення спробувати оцінити вказану характеристику досліджуваних сполук ( $P$ ). По перше, для визначення  $P$  скористаємося лише першим потенціалом іонізації хімічних елементів, значення яких наведені на діаграмі (рис. 3).

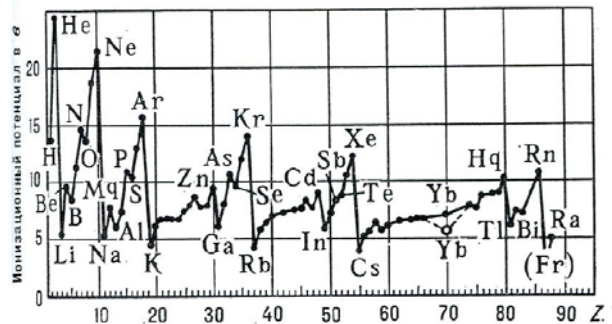


Рис. 3. Значення першого потенціалу іонізації хімічних елементів залежно від порядкового номера періодичної таблиці

Fig. 3. Value of the first potential of chemical elements ionization according to the serial number of the periodic table

Зумовлено наведене положення тим, що під час формування електричного дугового розряду в основному відбувається вилучення зовнішніх (валентних) електронів, в той час як вилучення більш наближених електронів до ядра атома потребує в декілька разів більшої енергії [11, 13].

З метою врахування достатньо складного взаємного впливу одночасно присутніх різних хімічних елементів в зоні електричного дугового розряду, необхідно зробити два припущення.

Перше припущення – це виконання оцінювання величин  $P$  досліджуваних сполук без урахування енергії, яка витрачається на повну дисоціацію молекул або хімічних з'єднань до атомарного стану. Друге припущення – приймається адитивний характер впливу потенціалів іонізації хімічних елементів, які утворюють молекулу або хімічне з'єднання, пропорційно їх кількості. Ефективність впливу досліджуваних сполук на процес формування електричного

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

розряду, що оцінюється за значеннями величини  $C$  (рис. 1), в дійсності повинна бути пов'язана з особливостями атомарної будови хімічних елементів, які утворюють сполуки. На підставі цього, можна очікувати існування кореляційного зв'язку між величинами  $C$  та  $P$ . Результат спроби парного нанесення вказаних характеристик наведений на рис. 4.

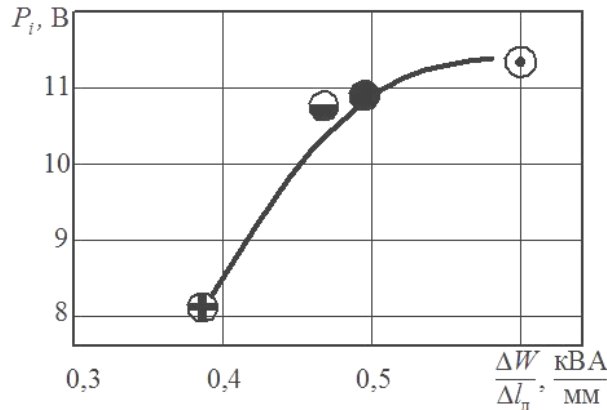


Рис. 4. Співвідношення між величинами  $P$  і  $C$  для досліджуваних речовин (○ – каолін; ● –  $SiO_2$ ; ◐ –  $CaCO_3$ ; ⊕ –  $Fe-Si$ )

Fig. 4. Ratios between the values  $P$  and  $C$  for the studied substances (○ – kaolin; ● –  $SiO_2$ ; ◐ –  $CaCO_3$ ; ⊕ –  $Fe-Si$ )

З характеру наведеного співвідношення можна говорити про існування між кутовим коефіцієнтом ( $C$ ) і величиною  $P$  пропорційного зв'язку. Якщо вважати, що за визначених умов формування електричного дугового розряду величина  $C$  характеризує вплив сполуки на процес горіння дуги, то цілком обґрунтованим слід очікувати існування зв'язку з величинами, які характеризують стан міжелектродного проміжку. За наведеною залежністю, порівняно з іншими досліджуваними сполуками, заповнення міжелектродного проміжку  $Fe-Si$  супроводжується формуванням електричного дугового розряду при найбільш низьких значеннях питомої потужності. Приблизно на 20% більшу потужність електричного струму необхідно мати для забезпечення умов збудження дугового розряду при заповненні міжелектродного проміжку  $CaCO_3$  та  $SiO_2$  та ще більшу для каоліну.

### Наукова новизна та практична значимість

1. На основі аналізу впливу досліджуваних речовин на процеси формування електричного дугового розряду визначений обернено-пропорційний зв'язок між потужністю електричного струму і максимальною довжиною дуги до моменту її розриву.

2. Співвідношення між максимальною довжиною дуги і потужністю електричного струму, з достатньо високим коефіцієнтом кореляції, підпорядковується експоненціальній залежності. Вплив досліджуваних сполук на процес формування електричного дугового розряду визначається через показники ступеня запропонованого співвідношення.

3. Величина питомої потужності електричного струму в момент формування електричного розряду, яка віднесена до довжини дуги, може бути прийнята як параметр, що характеризує стан міжелектродного середовища.

За умов однакової встановлювальної сили електричного струму визначена послідовність розташування досліджуваних речовин в порядку збільшення їх впливу на процес горіння дуги. Так, мінімальний вплив спостерігається з боку каоліну, а максимальний – для  $Fe-Si$ . Використання величини  $C$  дозволить на практиці оцінювати ступінь впливу суміші хімічних речовин і сполук на процес формування електричного дугового розряду.

### Висновки

1. За умов виконаних досліджень перенос металу в міжелектродному проміжку відповідає краплинному механізму.

2. Співвідношення між максимальною довжиною дуги і потужністю електричного струму в момент формування електричного розряду, для умов оберненої полярності, має вигляд експоненціальної залежності.

3. Вплив хімічної сполуки на стан середовища міжелектродного проміжку може бути оцінено за відношенням швидкості зміни потужності електричного розряду, в момент запалювання дуги, на одиницю її довжини.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Вакуленко, І. О. Структурні перетворення в металі залізничного колеса після дії імпульсів електричного струму / І. О. Вакуленко, В. А. Сокірко, О. С. Баскевич // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 42. – С. 160–163.
- Вакуленко, І. А. Морфологія структури і деформационне упрочнення сталі / І. А. Вакуленко, В. І. Большаков. – Д. : Маковецький, 2008. – 196 с.
- Кривцун, І. В. Модель процесів тепло-, масо- і електропереносу в анодній області і столбі сварочної дуги з тугоплавким катодом / І. В. Кривцун, В. Ф. Демченко, І. В. Крикент // Автомат. сварка. – 2010. – № 6. – С. 3–11.
- Лесков, Г. І. Електрическа сварочна дуга / Г. І. Лесков. – М. : Машиностроение, 1970. – 336 с.
- Приелектродні процеси в дугових розрядах / М. Ф. Жуков, Н. П. Козлов, А. В. Пустогаров і др. – Новосибірськ : Наука, 1982. – 157 с.
- Сварка в машинобудуванні : справочник / під ред. Н. А. Ольшанського. – М. : Машиностроение, 1978 – Т. 1. – 504 с.
- Щербаков, І. П. Исследование изменения субмикрорельефа поверхности медных образцов при пропускании по ним импульсов электрического тока большой плотности / І. П. Щербаков, Д. В. Чураев, В. Н. Светлов // Журн. техн. физики. – 2004. – Т. 74. – Вып. 4. – С. 139–142.
- Boulos, M. I. Thermal plasmas: Fundamentals and applications / M. I. Boulos, P. Fauchais, E. Pfender. – N.-Y. ; London : Plenum press, 1997. – Vol. 1. – 454 p.
- Electric pulse treatment of welding joint of aluminum alloy / I. A. Vakulenko, Yu. L. Nadezhdin, V. A. Sokirko et al. // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2013. – № 4 (46). – С. 73–82.
- Hu, J. Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Pt. I: The arc / J. Hu, H. L. Tsai // Intern. J. Heat and Mass Transfer. – 2007. – № 50. – P. 833–846. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.08.025.
- Investigation of cathode spot behaviour of atmospheric argon arcs by mathematical modeling / J. Wendelstorf, G. Simon, I. Decker et al. // Proc. of 12th Intern. Conf. on gas discharges and their applications. – Greifswald, 1997. – Vol. 1. – P. 62–65.
- Metal vapour behaviour in gas tungsten arc thermal plasma during welding / M. Tanaka, K. Yamamoto, S. Tashiro et al. // Welding in the World. – 2008. – Vol. 52, № 11/12. – P. 82–88. doi: 10.1007/bf03266686.
- Moore, Ch. E. Ionization potentials and ionization limits derived from the analysis of optical spectra / Ch. E. Moore. – Washington : NSRDS – NBS 34, 1970 – P. 46–57.
- Nestor, O. H. Heat intensity and current density distributions at the anode of high current, inert gas arcs / O. H. Nestor // J. of Applied Physics. 1962. – 33 (5). – P. 1638–1648. doi: 10.1063/1.1728803.
- Prediction of anode temperatures of free burning arcs / P. Zhu, J. J. Lowke, R. Morrow et al. // J. of Applied Physics. – 1995. – Vol. 28 (7). – P. 1369–1376.
- Sanders, N. A. Measurement of anode falls and anode heat transfer in atmospheric pressure high intensity arcs / N. A. Sanders, E. Pfender // J. of Applied Physics. – 1984. – Vol. 55 (3) – P. 714–722. doi: 10.1063/1.333129.

І. А. ВАКУЛЕНКО<sup>1\*</sup>, С. А. ПЛИТЧЕНКО<sup>2</sup>, Д. Н. МАКАРЕВИЧ<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Технологія матеріалів», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта dnuzt\_texmat@ukr.net, ORCID 0000-0002-7353-1916

<sup>2</sup>Каф. «Технологія матеріалів», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта dnuzt\_texmat@ukr.net, ORCID 0000-0002-0613-2544

<sup>3</sup>Каф. «Технологія матеріалів», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта dnuzt\_texmat@ukr.net, ORCID 0000-0003-4327-9809

## ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО РАЗРЯДА

**Цель.** Целью работы является сравнительный анализ влияния химических соединений на процесс формирования электрической дуги и условия ее горения. **Методика.** Материалом для электрода была низкоуглеродистая проволока диаметром 3 мм из стали с содержанием углерода 0,15 %. В качестве соединений, которые определяют условия формирования электродугового разряда, использовали каолин;  $CaCO_3$  с при-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

месями гипса до 60 %;  $SiO_2$  и  $Fe-Si$  при концентрации железа до 50 %. Исследования проводились при использовании постоянного электрического тока и дуги обратной полярности. В качестве источника электрического тока использовали сварочный преобразователь типа ПСО-500. На специальном стенде начальный зазор между электродом и металлической пластиной составлял значение 1–1,5 мм. Межелектродный промежуток заполняли исследуемым соединением и формировали электрический разряд. В момент возникновения электрической дуги определяли величины электрического тока и напряжения на дуге. После природного разрыва электрической дуги, окончательную величину зазора между электродами принимали в качестве максимального значения длины дуги. **Результаты.** В условиях эксперимента перенос металла в межэлектродном промежутке отвечал капельному механизму. По внешним признакам соотношение между максимальной длиной дуги и мощностью электрического тока имеет вид экспоненциальной зависимости. Удельная мощность электрического дугового разряда в момент формирования дуги на единицу ее длины характеризует состояние среды в межэлектродном промежутке. **Научная новизна.** 1. На основе анализа влияния исследуемых химических соединений на процессы формирования электрического дугового разряда определена обратно-пропорциональная связь между мощностью электрического тока и максимальной длиной дуги к моменту ее природного разрыва. 2. Соотношение между максимальной длиной дуги и мощностью электрического тока с достаточно высоким коэффициентом корреляции подчиняется экспоненциальной зависимости. Влияние исследуемых соединений на процесс формирования электрического дугового разряда определяется через показатели степени полученного соотношения. 3. Величина удельной мощности электрического тока в момент формирования электрического разряда на единицу длины дуги может быть принята в качестве параметра, который характеризует состояние среды в межэлектродном промежутке. **Практическая значимость.** В условиях одинаковой установочной силы электрического тока определена последовательность расположения исследуемых химических соединений в порядке увеличения их влияния на процесс горения дуги. Минимальное влияние наблюдается от каолина, а максимальное – от  $Fe-Si$ .

*Ключевые слова:* электрический дуговой разряд; длина дуги; мощность электрического тока; химическое соединение

I. O. VAKULENKO<sup>1\*</sup>, S. O. PLITCHENKO<sup>2</sup>, D. M. MAKAREVYCH<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Materials Technology», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 56, e-mail dnuzt\_textmat@ukr.net, ORCID 0000-0002-7353-1916

<sup>2</sup>Dep. «Materials Technology», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 56, e-mail dnuzt\_textmat@ukr.net, ORCID 0000-0002-0613-2544

<sup>3</sup>Dep. «Materials Technology», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 56, e-mail dnuzt\_textmat@ukr.net, ORCID 0000-0003-4327-9809

## INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOUNDS ON THE FORMING OF ELECTRIC ARC

**Purpose.** The purpose of work is a comparative analysis of chemical compounds influence on the process of electric arc forming and condition of its burning. **Methodology.** Material for an electrode was a wire 3 mm in diameter of low carbon steel with contain of carbon 0.15%. As chemical compounds, which determine the terms of forming of arc welding were used kaolin;  $CaCO_3$  with the admixtures of gypsum to 60%;  $SiO_2$  and  $Fe-Si$  with the iron concentration to 50%. Researches were conducted at the use of direct electric current and the arc of reverse polarity. As a source of electric current the welding transformer of type PSO-500 was used. On the special stand an initial gap between the electrode and metal-plate was equal to 1–1.5 mm. The interelectrode interval was filled with the probed chemical compounds and it was formed an electric arc. In the moment of electric arc arise the values of electric current and the arc voltage were determined. After the natural break of electric arc, the final size of the gap between electrodes was accepted as the maximal value of the arc lengths. **Findings.** In the conditions of experiment the metal transfer in interelectrode interval corresponded to the drop mechanism. According to external characteristics the ratio between the maximal arc length and the power of electric discharge has the appearance of exponential dependence. Specific power of electric arc characterizes environment of interelectrode interval in the moment of arc forming per unit of its length. **Originality.** 1. On the basis of influence analysis of the studied chemical compounds on the formation processes of electric arc inversely proportional relationship between the power of the electric cur-



## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

rent and the maximum arc length to the moment of its natural break is defined. 2. The ratio between the maximal arc length and the power of electric current with sufficiently high correlation coefficient is subjected to the exponential dependence. Influence of the studied compounds on the process of electric arc forming is determined using the degree values of the obtained ratio. 3. The value of specific power of electric current in the moment of electric arc forming per unit of its length can be accepted as the parameter, which characterizes the environment in the interelectrode interval. **Practical value.** In the conditions of identical adjusting strength of electric current it is determined the gradation of the studied chemical compounds in the order of increase of their influence on the process of the arc burning. Kaolin has the minimum influence and  $Fe - Si$  – the maximal one.

*Keywords:* welding arc; arc length; power of electric current; chemical compound

## REFERENCES

1. Vakulenko I.O., Sokirko V.A., Baskevych O.S. Strukturni peretvorennia v metali zaliznychnoho koleasa pislia dii impulsiv elektrychnoho strumu [Structural transformations in the railway wheel metal after electric current impulses]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 42, pp. 160-163.
2. Vakulenko I.A., Bolshakov V.I. *Morfologiya struktury i deformatsionnoye uprochneniye stali* [Structure morphology and the work-hardening]. Dnipropetrovsk, Makovetskiy Publ., 2008, 196 p.
3. Krivtsun I.V., Demchenko V.F., Krikent I.V. Model protsessov teplo-, masso- i elektroperenosa v anodnoy oblasti i stolbe svarchnoy dugi s tugoplavkim katodom [Model of heat, mass and electrical transfer in the anode region and the welding arc column with heat-proof cathode]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic Welding*, 2010, no. 6, pp. 3-11.
4. Leskov G.I. *Elektricheskaya svarchnaya duga* [Electric welding arc]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1970. 336 p.
5. Zhukov M.F., Kozlov N.P., Pustogarov A.V. *Prielektrodnyye protsessy v dugovykh razryadakh* [Near-electrode processes in the electric arcs]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1982. 157 p.
6. Olshanskiy N.A. *Svarka v mashinostroyenii. Tom 1* [Welding in mechanical engineering. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1978. 504 p.
7. Shcherbakov I.P., Churayev D.V., Svetlov V.N. Issledovaniye izmeneniya submikrorelyefa poverkhnosti mednykh obraztsov pri propuskaniy po nim impulsiv elektricheskogo toka bolshoy plotnosti [Investigation of submicrorelief change of the copper samples surface during the electric current pulse advancing of high density]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Journal of Technical Physics*, 2004, vol. 74, issue 4, pp. 139-142.
8. Boulos M.I., Fauchais P., Pfender E. Thermal plasmas: Fundamentals and applications. Vol. 1. New York; London, Plenum press Publ., 1997. 454 p.
9. Vakulenko I.A., Nadezhdin Yu.L., Sokirko V.A. Electric pulse treatment of welding joint of aluminum alloy. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2013, no. 4 (46), pp. 73-82.
10. Hu J., Tsai H.L. Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Pt I: The arc. *Intern. Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, no. 50, pp. 833-846. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.08.025.
11. Wendelstorf J., Simon G., Decker I. Investigation of cathode spot behaviour of atmospheric argon arcs by mathematical modeling. Proc. of 12th Intern. Conf. on gas discharges and their applications. Greifswald, 1997, vol. 1, pp. 62–65.
12. Tanaka M., Yamamoto K., Tashiro S. Metal vapour behaviour in gas tungsten arc thermal plasma during welding. *Welding in the World*, 2008, vol. 52, no. 11/12, pp. 82-88. doi: 10.1007/bf03266686.
13. Moore Ch.E. Ionization potentials and ionization limits derived from the analysis of optical spectra. Washington, NSRDS – NBS 34 Publ., 1970, pp. 46-57.
14. Nestor O.H. Heat intensity and current density distributions at the anode of high current, inert gas arcs. *Journal of Applied Physics*, 1962, no. 33 (5), pp. 1638-1648. doi: 10.1063/1.1728803.
15. Zhu P., Lowke J.J., Morrow R. Prediction of anode temperatures of free burning arcs. *Journal of Applied Physics*, 1995, vol. 28 (7), pp. 1369-1376.
16. Sanders N.A., Pfender E. Measurement of anode falls and anode heat transfer in atmospheric pressure high intensity arcs. *Journal of Applied Physics*, 1984, vol. 55 (3), pp. 714-722. doi: 10.1063/1.333129.

*Стаття рекомендована до публікації к.т.н., доц. С. В. Проїдаком (Україна); к.т.н., доц. О. О. Чайковським (Україна)*

Поступила до редакції: 15.05.2014

Прийнята до друку: 18.07.2014