

ПРОЦЕСИ ПРИ ЗБУДЖЕННІ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ДУГИ (Огляд)

Н.М. Махлін

ДП «НІЦ ЗКАЕ ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України». 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: electro@paton.kiev.ua

У зв'язку з відсутністю дотепер повної теорії процесу збудження зварювальної дуги, яка б змогла переконливо пояснити усю сукупність відомих фактів, розглянуті деякі важливі теоретичні та експериментальні відомості різних авторів щодо процесів первісного збудження зварювальної дуги при дуговому та плазмовому зварюванні, що важливо для побудови електронних вольтододаючих пристроїв, які генерують імпульси високої та підвищеної напруги, що інжектуються у міжелектродний проміжок для забезпечення безконтактних первісного та повторних збуджень зварювальної дуги. Наведено отримані на основі багатьох досліджень (у тому числі теоретичних), досвіду розробки та застосування вольтододаючих пристроїв вимоги до параметрів імпульсів, що генеруються цими пристроями. Запропоновано аналітичні вирази для створення теорії процесу збудження зварювальної дуги постійного струму. Бібліогр. 15.

Ключові слова: збудження зварювальної дуги при дуговому та плазмовому зварюванні, тліючий, іскровий та дуговий розряди, напруга первісного підпалу, повторні збудження дуги змінного струму, комбіновані пристрої–збудники–стабілізатори, енергія, амплітуда, тривалість імпульсів

Безконтактне збудження зварювальної дуги – одна з найважливіших стадій зварювального циклу, що у більшості випадків здійснюється висковольтним пробоем міжелектродного проміжку за рахунок застосування іскрового розряду. Незважаючи на значний інтерес дослідників до іскрового розряду, до цього часу теорії цього процесу не існує. Згідно з усталеними поняттями сучасної електрофізики іскровий розряд (внаслідок якого здійснюється збудження зварювальної дуги) відноситься до несамостійного аномального тліючого розряду, який в момент свого завершення має перейти до сталого дугового [1, 2]. Відповідно до цих понять, температури та тиску газу у каналі іскри, температура газу у цьому каналі може досягати 10000 К, що викликає можливість термічної іонізації, а явища, що відбуваються при іскровому розряді, знаходять пояснення у теорії стримерів (плазмових каналів, що проростають від аноду до катоду газового проміжку) [1]. Як зазначено у [1, 2], при прикладенні електричного поля до газового міжелектродного проміжку наявні у цьому проміжку заряджені частинки зазнають розгону цим електричним полем, при цьому слід відзначити, що, оскільки маса іонів значно перевищує масу електронів, то у їх взаємодії основна роль належить електронам. Якщо енергія електронів достатня для іонізації газу, то кількість заряджених частинок буде зростати, а у напрямку від катоду до аноду будуть рухатися електронні лавини, залишаючи за собою позитивний просторовий об'ємний заряд, причому випадкові електрони та електрони, утворені у газі при фотоіонізації вна-

Махлін Н.М. – <https://orcid.org/0000-0001-5235-6242>

© Н.М. Махлін, 2020

слідок випромінювання збуджених електронами атомів та молекул, будуть втягнені у зону об'ємного заряду, створюючи на своєму шляху нові дочірні лавини [1].

Першою умовою утворення стримерів є:

$$\frac{\alpha}{p} e^{\frac{\alpha}{p} pd} = 2,19 \cdot 10^8 \frac{E_3}{p} \sqrt{\left(\frac{d}{pd}\right)} \cdot d, \quad (1)$$

де α – коефіцієнт об'ємної іонізації, m^{-1} ; p – тиск газу, Па; d – відстань між електродами, м; E_3 – напруженість електричного поля між електродами, $\frac{V}{m}$.

Користуючись виразом (1), можливо знайти значення напруги іскрового пробоя U_3 за виразом:

$$U_3 = E_3 d, \quad (2)$$

але вираховані за цим виразом значення добре співпадають з експериментальними лише у випадках, коли $pd \geq 250$ мПа, що практично не буває при дуговому або плазмовому зварюванні.

До другої умови утворення стримеру належить формула

$$n_i \geq 7 \cdot 10^{20} \text{ ion}/m^2, \quad (3)$$

де n_i – концентрація іонів у головці лавини.

Для відносно коротких іскрових проміжків (що є характерним для дугового та плазмового зварювання) умова (3) завжди виконується, якщо виконується умова (1).

В основу наближеної теорії іскрового розряду звичайно покладається гіпотеза Теплера, за якою провідність іскрового каналу пропорційна заряду, який пройшов через міжелектродний проміжок:

$$G = k \int_0^t idt, \quad (4)$$

де G – провідність іскрового каналу, Om^{-1} ; k – коефіцієнт пропорційності, який залежить від складу, температури та тиску газу у іскровому каналі. Або гіпотеза Вайцеля та Ромпе, згідно з якою уся енергія, що виділяється у іскровому каналі, йде на збільшення внутрішньої енергії плазми та пропорційна провідності іскрового каналу і в цьому випадку [1]:

$$G = k \left(\int_0^t i^2 dt \right)^{1/2} \quad (5)$$

Проте слід зауважити, що обидві наведені гіпотези – (4) та (5) описують початкову стадію процесу іскрового розряду й не враховують спадання провідності іскрового каналу у завершальній стадії процесу.

У свою чергу, гідродинамічна теорія при енергії імпульсу, яка характерна для іскрового підпалу зварювальної дуги, приводить до наступної залежності провідності від напруги на міжелектродному проміжку:

$$G = kCl^{-7/3} (U^2 - u^2)^{3/2} \times \left[6U^4 \ln \frac{U}{u} - \frac{3}{2} (U^2 - u^2) (3U^2 - u^2) \right]^{-1/6} \quad (6)$$

де C – ємність, що безпосередньо підключена до іскрового проміжку, Φ ; l – довжина іскрового проміжку, м; U – початкова напруга на цьому проміжку, яка приблизно дорівнює напрузі пробією, В [1].

Повздожня напруженість електричного поля у іскрі, що передують формуванню сталого дугового розряду, який характеризується відносно великими значеннями струму (до 10^4 А) та щільністю струму на катоді (до 10^{10} А/м²) при відносно низькій дуговій напрузі (від декількох одиниць до десятків В), складає кілька кВ/см [1–4].

Таким чином, встановлено [1–3, 5–7], що стример може утворюватися у газовій плазмі, у якій звичайно хаотичний рух заряджених частинок переважає їх спрямований рух під дією електричного поля або у результаті дифузії, при цьому має виконуватися рівність

$$U = U_c + U_p + U_a, \quad (7)$$

тобто утворення стримеру залежить не тільки від складу, температури та тиску газу у міжелектродному проміжку, а й від стану та явищ, що відбуваються у приелектродних областях та стовпі зварювальної дуги.

Розподілення електричного потенціалу уздовж довжини міжелектродного проміжку наведено у [1–6, 8, 9], причому у роботі [9] детально та комплексно проаналізовано явища на аноді та у стовпі багатострумової зварювальної дуги і описано математичні моделі, які побудовані на основі цьо-

го аналізу, у результаті якого автор стверджує, що потенціал плазми стовпа дуги на межі з анодним шаром є неоднорідним, тобто залежить від координати уздовж вказаної межі. Це викликає з'явлення компоненти градієнту електричного потенціалу та, відповідно, компоненти щільності струму уздовж межі анодного шару, що у багато чому визначає картину протікання електричного струму між дуговою плазмою та анодом.

Для опису плазми, що межує з поверхнею аноду, автор роботи [9] умовно поділяє прианодну плазму на декілька зон. Перша з них, яка безпосередньо прилягає до поверхні аноду, – шар просторового заряду (Sheath), де порушується умова квазінейтральності плазми та формується частина падіння потенціалу між плазмою та анодом. Проте цим можливо знехтувати, враховуючи, що за тиску, наближеному до атмосферного, та значеннях температури плазми, близьких до 1 еВ, характерних для умов дугового або плазмового зварювання, товщина цього шару спільномірна з радіусом Дабаю, який приблизно становить 10^{-8} м, що суттєво менше довжин вільного пробігу частинок прианодної плазми, які приблизно складають від 10^{-7} до 10^{-4} м.

Друга зона – іонізаційний шар або передшар (Presheath) – це область неізотермічної квазінейтральної багатокомпонентної плазми, де відбувається генерація заряджених частинок за рахунок іонізації плазмовими електронами атомів газу, які десорбують з поверхні аноду, та за рахунок атомів анодного металу, який випаровується. Іони, які утворюються у цій зоні, прискорюються у напрямі поверхні аноду електричним полем, створеним більш рухомими електронами, та рекомбінують поблизу цієї поверхні, і, відтак у межах передшару порушуються умови локальної іонізаційної рівноваги, тобто концентрації заряджених частинок $n_e = n_i$ відрізняються від рівноважної концентрації n_{Sa} , розрахованої за допомогою рівнянь Саха. Крім цього, тут відбувається помітне падіння потенціалу прианодної плазми, яке може бути значно більшим, ніж його зміни у шарі просторового заряду.

На думку автора роботи [9], на відстані від поверхні аноду, рівної декільком довжинам вільного пробігу важких частинок плазми, проходить зовнішній кордон анодного шару, за яким починається область стовпа дуги, де встановлюється локальна термодинамічна рівновага. У свою чергу, зазначена область умовно також може бути поділена на дві зони. Перша з цих зон є шар неізотермічної іоноваційно рівноважної плазми, в межах якого відбувається вирівнювання з температурою у стовпі дуги T температури електронів T_e та температури важких частинок T_h .

Інша зона є власне стовпом дуги (температури вимірюються у К). При цьому автор роботи [9] припускає, що поверхня аноду плоска, і це дозволяє йому побудувати одномірну математичну модель анодного шару великострумової дуги, яка горить у середовищі інертного газу атмосферного тиску. Таке твердження є цілком справедливим, якщо зварювальний струм становить $6 \cdot 10^2$ А і більше, але враховуючи, що утворення стримерів відбувається на дуже малих струмах і напруга пробою різко залежить від викривлення електричного поля, використання цього твердження не є можливим. У роботі [2] її автор наводить узагальнений вираз для напруги електричного пробою $U_{пр}$ у більшості плазмотронів та пальників для зварювання у середовищі інертних газів

$$U_{пр} = \left(K'_{1пов} - K'_{2пов} \frac{P}{P_0} \right) \left[1 - k \cdot \lg \frac{f}{f_{кр}} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \times \left[1 + \left(\frac{\tau_0}{t_{и}} \cdot \frac{P_0 h_0}{ph} \right)^{\frac{1}{3}} \right] U_{ст}, \quad (8)$$

де $K'_{1пов}$, $K'_{2пов}$ та k – коефіцієнти, які залежать від чистоти обробки поверхні електроду плазмотрону або пальнику для зварювання у середовищі інертних газів: коефіцієнт τ_0 – тривалість запізнення розряду при $P_0 h_0$ – також залежить від чистоти обробки поверхні електроду плазмотрону або пальнику – $\tau_0 = \tau_0 K'_{2пов}^{-1}$.

При цьому слід зазначити, що коефіцієнт $K'_{2пов}^{-1}$ також можливо визначити експериментальним шляхом і тому вираз (8) потребує багато експериментальних зварювань й мало придатний для виконання інженерних розрахунків. Також слід зазначити, що рішення задачі електричного пробою можливе шляхом побудови одномірної або багатомірної моделі. Переваги одномірної задачі електричного пробою полягають в тому, що така модель надає можливість аналізувати формули та графіки, але при цьому відсутня гарантія повного співпадіння з результатами дослідів.

Досвід та численні експерименти переконливо доводять, що розрахункові та фактичні значення напруги електричного пробою співпадають з (8) максимум на 50 % та залежать від низки чинників, і тому розробники імпульсних зварювальних осциляторів або електронних генераторів високовольтних імпульсів для забезпечення безконтактного первісного збудження зварювальної дуги змушені застосовувати пристрої, які генерують імпульси з амплітудою від 4,0 до 10,0 кВ. Оскільки теорія багатомірної моделі електричного пробою дотепер не існує, можливо припустити, що ця модель більш застосовна для аналізу явищ, по-

в'язаних з повторними збудженнями при змінному зварювальному струмі. У випадку постійного зварювального струму більш застосовна одномірна модель.

Як стверджує низка авторів [1–6, 8–10], основним газодинамічним процесом у каналі іскрового розряду є його розширення під дією ударної хвилі, що дозволяє вважати прийнятною однорідну модель цього розряду з щільною оболонкою, а плазму розряду розглядати як термодинамічно рівноважну, яка характеризується температурою T , при цьому тиск у каналі можливо вважати постійним, рівним тиску незбудженого газу. Автор роботи [2] також стверджує, що, у всякому разі, зазначений характер ударна хвиля має за максимумом струму.

У роботі [2] показано, що вплив початкових умов на провідність міжелектродного проміжку у кінці процесу іскрового розряду, як і індуктивності розрядного ланцюгу (яка впливає, головним чином, на початкову стадію процесу), є незначним. Процес розвитку іскрового каналу закінчується у момент, коли напруга на міжелектродному проміжку стає дорівнювати напрузі неробочого ходу джерела зварювального струму.

Утворення струмопровідного іскрового каналу забезпечує стрибкоподібне збільшення провідності міжелектродного проміжку і, якщо зварювальне джерело живлення, яке під'єднано до цього проміжку, має достатню потужність, то електрична іскра може перетворитися у тривалий нестаціонарний дуговий розряд з властивими йому катодною та анодною плямами.

Г.І. Лесков та В.П. Лугін, виконавши низку дослідно-експериментальних робіт, прийшли до висновків, важливих для побудови імпульсних пристроїв, призначених для первісного безконтактного збудження зварювальної дуги [11]. Цими дослідниками доведено, що при інших рівних умовах матеріал зварювальних електродів, склад їх покриття та звичайні для зварювання швидкості витікання газів на значення напруги електричного пробою практично не впливають. Також не виявлено скільки-небудь помітного впливу частоти прямування (у діапазоні від 100 до 3000 Гц) та форми високовольтних імпульсів, які надходять до міжелектродного проміжку. Встановлено, що основними чинниками, які визначають значення напруги електричного пробою (тобто утворення стримеру) є склад газу у міжелектродному проміжку, довжина цього проміжку та ступінь неоднорідності в ньому електричного поля, при цьому головна молекулярно-кінетична характеристика газу, від якої залежить значення напруги електричного пробою, є рамауерівський переріз атомів або молекул газу.

Аналіз результатів роботи [11] та експериментальних робіт інших дослідників дозволив одержати емпіричні вирази для визначення приблизних усереднених значень напруги електричного пробою ($U_{пр}$) у деяких газових середовищах технологічно вмотивованих міжелектродних проміжків [12]. Стосовно тривалості запізнення, що має місце при прикладанні до міжелектродного проміжку напруги електричного пробою, то ця тривалість визначається, головним чином, інтервалом часу до появи першого електрону, який здатен викликати утворення лавини (утворення стримеру), тобто статистичним інтервалом часу запізнення, який залежить від концентрації молекул у газовому об'ємі цього проміжку та від перевищення значення напруги над значенням напруги електричного пробою у статичному полі. В реальних зварювальних установках зазвичай тривалість запізнення не перевищує кількох мікросекунд, а вольт-секундна характеристика, тобто залежність напруги електричного пробою від тривалості імпульсу, прикладеного до міжелектродного проміжку, може бути визначена за даними Купера або Рітца або з використанням кривих Пашена. При вірогідності електричного пробою 50 % для умов, що існують при дуговому та плазмовому зварюванні, згідно [1], вольт-секундна характеристика може бути з великим наближенням вирахована за виразом

$$U_{пр} = \left(1 + 3 \sqrt[3]{\frac{a}{t_{и} pd}} \right) U_{пр.ст}, \quad (9)$$

де a – константа, яка залежить від роду газу у міжелектродному проміжку; $t_{и}$ – тривалість імпульсу напруги, прикладеної до міжелектродного проміжку C ; $U_{пр.ст}$ – напруга електричного пробою у однорідному статичному полі, В.

Якщо при заданому значенні d (довжини міжелектродного проміжку) енергія $W_{и}$ імпульсу напруги, прикладеної до нього, достатня, то безпосередньо після електричного пробою проміжку у ньому відбувається іскровий розряд, що, як встановлено у ВНИИЭСО [1], початкова стадія іскрового розряду супроводжується суттєвим зростанням провідності міжелектродного проміжку, а у завершуючій стадії іскрового розряду – її падінням [1, 2]. В залежності від умов у міжелектродному проміжку та властивостей під'єданого до нього зварювального джерела живлення, по завершенню іскрового розряду можливе або повне згасання цього розряду або ж виникнення тліючого чи дугового розряду. Дослідження показали [1], що дуга у міжелектродному проміжку виникає тільки у тому випадку, коли опір R_k струмопровідного каналу, утвореного іскровим розрядом, менше деякого порогового значення $R_{пор}$, яке залежить

від швидкості вводу струму зварювального джерела живлення у канал, постійної часу дуги, напруги на проміжку $u(t)$ та інших чинників. Для зварювальної дуги постійного струму приблизне значення $R_{пор}$ може бути визначено за виразом:

$$R_{пор} \approx \left(\frac{n\theta \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0} U_{xx}^{\frac{n+3}{n-1}} a^{\frac{n+1}{n-1}}}{2 + n\theta \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0} U_{xx}^{\frac{n+1}{n-1}} a^{\frac{n}{n-1}}} \right)^n, \quad (10)$$

де n – показник ступеню апроксимації; θ – постійна часу дуги, с; di/dt – швидкість зростання струму живлення дуги у початковий момент (при $t = 0$), А/с; $U_{xx} = u(0)$ – напруга неробочого ходу зварювального джерела живлення, В.

Виконання умови $R_k < R_{пор}$ залежить не тільки від рівня $U_{пр}$, але й від рівня потужності імпульсів напруги, які викликають у міжелектродному проміжку іскровий розряд. Оскільки тривалість цих імпульсів визначається реактивними параметрами та добротністю формуючих контурів генераторів імпульсів підвищеної напруги (ГІН) вольтододаючих пристроїв та ланцюгів живлення дуги, то набагато зручніше оперувати таким параметром імпульсів, як їх енергія $W_{и}$ (у Дж). Також оскільки у переважній більшості випадків при формуванні імпульсів, що виробляються ГІН, розходиться енергія ємносних накопичувачів, які заряджаються попередньо, то можна вважати, що $W_{и} = CU_c^2/2$, де C – ємність конденсатору (конденсаторів) накопичувача, Ф; U_c – стала напруга заряду ємнісного накопичувача, В. У роботі [12] наведено значення $W_{и}$, які рекомендовані для різних газових середовищ і технологічно вмотивованих міжелектродних проміжків та одержані експериментально та підтверджені досвідом розробки й застосування електронних вольтододаючих пристроїв.

Утворення стримерів залежить також і від катодних явищ [1, 4, 8], але слід зазначити, що їх теорія розроблена далеко не в повній мірі, як і теорія збудження дуги змінного струму.

Поблизу катоду через велику рухомість електронів утворюється незкомпенсований об'ємний заряд, завдяки якому існує катодне падіння потенціалу U_k . Крім цього, біля катоду існує область переходу від стовпа дуги до звуженої – такої, що зазнає контракції – катодної області [1]. Тут напруженість електричного поля значно вища, ніж у стовпі дуги. У зоні катодного падіння потенціалу електрони та позитивні іони зазнають прискорення, завдяки чому електрони можуть здійснювати ударну іонізацію, а іони – переносити значно більшу частку струму у порівнянні з плазмою стовпа [1].

Енергія, яка отримана катодом від іонів, що приносять свою енергію нейтралізації та кінетич-

ну енергію руху та яка надходить з плазми стовпа (внаслідок теплопровідності та випромінювання), витрачається на компенсацію роботи виходу електронів, на теплопровідність та випромінювання катоду, на його плавлення та випаровування й на дисоціацію молекулярних газів [1, 4, 8]. Частка усіх цих складових різна і залежить від умов, у яких горить дуга. Серед цих умов головна роль належить матеріалу катоду [1]. Розрізняють два типи катодів: «неплавкі» або гарячі катоди з вольфраму або вугілля, та «плавкі» або холодні електроди з легкоплавких матеріалів. На тугоплавких катодах, що, в основному застосовуються при дуговому та плазмовому зварюванні, утворюється стаціонарна пляма, яка досить сильно випромінює. При цьому із збільшенням температури катоду до деякого критичного значення пляма стрибком щезає, а звуження стовпа поблизу катоду відсутнє [1].

Вольт-амперна залежність прикатодної дільниці стовпа дуги при малих струмах – спадна [1, 2, 4, 8, 9].

Температура катоду наближена до температури плавлення металу, що зварюється, при цьому щільності струму на катод, які виміряні по площі плями, коливаються від 10^9 А/м² у дугах з плямою до 10^7 А/м² у дугах без плями А/м². Оскільки теорія, яка пояснює увесь фактичний матеріал щодо катодних явищ, дотепер відсутня, то краще за все явища при застосуванні «неплавкого», тобто тугоплавкого, електроду описує теорія термоелектронної дуги, згідно з якою струм з катоду забезпечується термоелектронами та іонами.

Щільність термоелектронного струму визначається формулою Річардсона–Дешмена або формулою, яка враховує викривлення потенціального бар'єру. Енергія, яка необхідна для створення термоелектронів, до катоду постачається іонами і у цьому випадку частка іонного струму J_p складає

$$\frac{j_p}{j} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_k + U_{\text{нейтр}}} \quad (11)$$

Для різних умов це значення коливається від 0,15 до 0,35, і при менших значеннях частки іонного струму для пояснення необхідного нагріву катоду потрібно враховувати тепловіддачу з плазми [1].

Слід зазначити, що термоелектронна теорія не в змозі пояснити явища на катоді з легкоплавких матеріалів, бо у цьому випадку для утворення просторового заряду необхідна щільність струму біля катоду має бути щонайменше 10^{11} А/м². З урахуванням наявності термоелектронів це значення зменшується до реального значення 10^9 А/м². Згідно з автоелектронною теорією $J_p \ll i_e$ струм переноситься електронами, які у зоні катодного падіння потенціалу здійснюють ступінчасту іонізацію.

При розрахунку щільності автоелектронного струму крім врахування наявності на поверхні катоду плівки діелектрику, також слід враховувати наявність мікронерівностей на його поверхні, через які ефективна напруженість поля може збільшитися у декілька разів [1]. Але, не зважаючи на ці уточнення, автоелектронна теорія теж не в змозі пояснити увесь комплекс процесів на холодному катоді.

Оскільки для дугового та плазмового зварювання використовується змінний струм переважно промислової та близьких до неї частот (від 50 до 400 Гц), наявні усі підстави вважати, що умова $R_k < R_{\text{пор}}$ справедлива у випадку змінного струму, при цьому $R_{\text{пор}}$ також визначається за виразом (10), який обумовлює характерні для змінного струму вимоги до моменту початку генерації імпульсів, що збуджують зварювальну дугу.

Збудження дугового розряду багато у чому залежить від значення прикладеної до міжелектродного проміжку напруги, тому збуджуючий зварювальну дугу імпульс має починати інjektуватися у міжелектродний проміжок поблизу максимуму цієї напруги (поблизу амплітуди напруги неробочого ходу зварювального джерела живлення дуги). Численними дослідженнями встановлено, що при синусоїдальній формі струму дуги фаза початку генерації збуджуючого дугу імпульсу має складати (75...80) електр. град. відносно нульової фази напруги неробочого ходу зварювального джерела живлення, при цьому має виконуватися умова достатньо високої швидкості зростання струму дугового розряду. Найбільша ефективність первісного збудження дуги змінного струму досягається у тому випадку, коли фаза початку генерації збуджуючого зварювальну дугу імпульсу співпадає з моментом переходу сталого зварювального струму дуги через нульове значення. Крім цього, для здійснення безконтактного первісного збудження дуги важливе значення мають електрофізичні умови емісії з електродів, які для дуги змінного струму можуть бути вельми різними у залежності від матеріалу електродів та від того, чи є електрод у момент первісного збудження дуги анодом або катодом. Особливо це характерно для ТІГ-зварювання алюмінію та його сплавів, при якому первісне збудження дуги практично завжди відбувається у інтервали часу, коли катодом є виріб, що зварюється. Як здається, це можливо пояснити тим, що при збудженні зварювальної дуги неплавкому (вольфрамовому) електроду властива термоемісія, утворення якої пов'язано з необхідністю розігріву електроду до температури емісії, а це процес інерційний, у той же час при формуванні катоду на виробі, що зварюється, з алюмінію та його сплавів (особливо, якщо зовнішня поверхня виробу покрита окисною плів-

кою Al_2O_3) має місце практично безінерційна автоелектронна емісія [1, 2, 10, 13].

Питання стійкості зварювальної дуги змінного струму приваблювали на протязі минулого сторіччя й продовжують у цьому сторіччі приваблювати увагу дослідників та фахівців як у галузі електротехнологій, так і у галузі електроапаратобудування. У результаті багаторічних широких теоретичних та експериментальних досліджень, узагальнених, наприклад, у роботах [1, 9–15], накопичено значний досвід, який дозволяє пояснити низку явищ та особливостей дуги змінного струму, а також сформулювати, у тому числі із застосуванням аналітичних методів, основні умови сталості дугового розряду.

Зварювальна дуга змінного струму періодично змінює свою полярність і, внаслідок цього, один і той же електрод по черзі буває то катодом, то анодом. Зміна полярності електродів викликає зміни інтенсивності та напрямку газових потоків у дузі та переорієнтацію заряджених частинок у її стовпі. Встановлено, що саме процеси у стовпі дуги впливають визначальним чином на поведінку зварювальної дуги та її характеристики на протязі майже повної тривалості кожного напівперіоду змінного струму, за виключенням коротких проміжків часу поблизу переходу струму через нульове значення, на протязі яких дуговий розряд відсутній, і, у кращому випадку, має місце тліючий у залишковій плазмі [1, 5, 7, 9, 10, 12–15].

Наявність пауз у існуванні дугового розряду у міжелектродному проміжку поблизу переходу струму через нульове значення є основною характерною особливістю зварювальної дуги змінного струму, у кінці кожного напівперіоду якого перед згасанням дугового розряду та після нього температура газу у дузі суттєво зменшуються, а ступінь його іонізації, і, відповідно, провідність міжелектродного проміжку значно знижуються, при цьому знижується й температура анодної та катодної плям [1, 9, 10, 12–14].

Детально ця та інші особливості зварювальної дуги змінного струму розглянуті у роботах [1, 4, 10, 12].

Висновки

1. Для більшого пояснення усієї сукупності процесів, які пов'язані з первісним та повторними збудженнями зварювальної дуги, у тому числі дуги змінного струму, а також для розробки інженерних методик розрахунку комбінованих пристроїв–збудників–стабілізаторів, потрібні подальші теоретичні та експериментальні дослідження, особливо у напрямку вивчення прикатодних явищ.

2. У результаті розгляду та узагальнення особливостей безконтактних первісного та повторних

збуджень зварювальної дуги, виконаних на основі використання відомих літературних джерел, теоретичних та експериментальних робіт різних авторів та наявного у нас досвіду розробки та застосування засобів реалізації цих процесів встановлено, що у режимі первісного збудження (запалювання) дуги в залежності від умов у міжелектродному проміжку (його довжини, роду та тиску газу у ньому, форми та чистоти обробки робочого торця зварювального електроду та виробу, що зварюється, основні параметри вихідних високовольтних імпульсів, які генеруються комбінованими збудниками–стабілізаторами, мають мати наступні значення: енергія імпульсу – від 0,01 до 0,50 Дж, амплітуда імпульсу – від 3,5 до 10,0 кВ, тривалість (на рівні 0,05 амплітудного значення) – від 3 до 20 мкс.

Також встановлено, що у режимі стабілізації зварювальної дуги змінного струму (тобто при повторних її збудженнях) у залежності від ступеню деіонізації та пов'язаного з нею зменшення провідності міжелектродного проміжку при кожній зміні полярності струму дуги основні параметри вихідних високовольтних імпульсів, які генеруються комбінованими збудниками – стабілізаторами, мають складати: енергія імпульсу – від 0,2 до 1,0 Дж, амплітуда імпульсу – від 400 до 950 В, тривалість (на рівні 0,05 амплітудного значення) – від 50 до 100 мкс, а у окремих випадках (наприклад, при зварюванні плавким електродом у середовищі CO_2) – від 0,2 до 1,0 мс.

3. Для рішення задачі визначення потрібних параметрів імпульсів первісного та повторних збуджень зварювальної дуги можуть застосовуватися як одномірна, так і багатомірна моделі (проте теорії багатомірної моделі до цього часу не існує). Для рішення задачі визначення оптимальних параметрів імпульсів первісного збудження зварювальної дуги постійного струму найбільш застосовна та розповсюджена одномірна модель, яка надає можливість аналізувати формули та графіки, але не гарантує повного співпадіння з дослідженнями. При рішенні задач повторних збуджень дуги змінного зварювального струму може знайти застосовність (незважаючи на відсутність повноцінної теорії) й багатомірна модель. У цьому випадку виникає потреба у введенні для кожного параметру поправкового коефіцієнту K_{Γ} , які рівні відношенню в кожній точці експериментального значення. У подальшому все залежить від результатів отриманих експериментальних поправкових кривих.

4. Створення комбінованих збудників–стабілізаторів можливе лише за умови, якщо їх побудова передбачає послідовне підключення вихідних ланцюгів цих пристроїв у коло зварювальної або допоміжної (чергової) дуги.

Автор висловлює свою подяку інженерам Д.С. Оліяненку та В.Ю. Буряку за цінну допомогу, яку вони надали при підготовці цієї роботи.

Список літератури

1. (1986) *Оборудование для дуговой сварки. Справ. пособие.* Смирнов В.В. (ред.). Ленинград, Энергоатомиздат.
2. Темкин Б.Я. (1981) *Теория и расчет возбуждителей сварочной дуги.* Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ленинград.
3. Райзер Ю.П. (1987) *Физика газового разряда.* Москва, Наука.
4. Гвоздецкий В.С. (1969) К теории катодных процессов в электрической дуге. *Автоматическая сварка*, **1** (часть 1), 33–37; **6** (часть 2), 1–4.
5. *Электротехнический справочник.* (1980) В 3-х т. Т.1. Общие вопросы. Электротехнические материалы. Герасимов В.Г., Грудинский П.Г., Жукова Л.А. и др. (редакторы.) 6-е изд., испр. и доп. Москва, Энергия.
6. Патон Б.Е., Заруба И.И., Дыменко В.В., Шатан А.Ф. (2007) *Сварочные источники питания с импульсной стабилизацией горения дуги.* Киев, Екотехнологія.
7. Farson D., Courardy C., Talkington J. et al. (1998) Arc initiation in gas metal arc welding. *Welding Res. Supl.*, **8**, 315–321.
8. Кесаев И.Г. (1968) *Катодные процессы в электрической дуге.* Москва, Наука.
9. Кривцун И.В. (2018) Анодные процессы в сварочных дугах. *Автоматическая сварка*, **11–12**, 103–117.
10. Лесков Г.И. (1970) *Электрическая сварочная дуга.* Москва, Машиностроение.
11. Лесков Г.И., Лугин В.П. (1971) Исследование электрического пробоя промежутков между сварочными электродами. *Сварочное производство*, **2**, 10–11.
12. Махлин Н.М. (2015) Особенности бесконтактных возбуждений дуги переменного тока. *Автоматическая сварка*, **10**, 30–37.
13. Weinshehk H.E., Schellhase M. (1971) Wiedezundugscharakteristiken von Schweißlichtbogen mit abschmelzen der Elektrode. *ZIS-Mitt.*, **13**, **12**, 1706–1720.
14. Коротинський О.С. (2007) *Високоєфективні джерела живлення для дугового зварювання на основі індуктивно-ємнісних перетворювачів.* Дис. ... д-ра. техн. наук. Київ.

15. Походня И.К. (1967) *Плавление электрода и взаимодействие металла с газами при дуговой сварке.* Дис. ... д-ра техн. наук. Киев.

References

1. (1986) *Equipment for arc welding: Refer. book.* Ed. by V.V. Smirnov. Leningrad, Energoatomizdat [in Russian].
2. Temkin, B.Ya. (1981) *Theory and calculation of welding arc exciters.* In: Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Degree. Leningrad [in Russian].
3. Rajzer, Yu.P. (1987) *Physics of gas discharge.* Moscow, Nauka [in Russian].
4. Gvozdetzky, V.S. (1969) To the theory of cathode processes in electric arc. *Avtomatich. Svarka*, **1** (Pt 1), 33–37; **6**, (Pt 2), 1–4 [in Russian].
5. (1980) *Electrotechnical reference book.* In: 3 Vol., Vol. 1: General problems. Electrotechnical materials. Ed. by V.G. Gerasimov, P.G. Grudinsky, L.A. Zhukova, et al. 6st Ed. Moscow, Energiya [in Russian].
6. Paton, B.E., Zaruba, I.I., Dymenko, V.V., Shatan, A.F. (2007) *Welding power sources with pulsed stabilization of arc burning.* Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].
7. Farson, D., Courardy, C., Talkington, J. et al. (1998) Arc initiation in gas metal arc welding. *Welding Res. Supl.*, **8**, 315–321.
8. Kesaev, I.G. (1968) *Cathode processes in welding arcs.* Moscow, Nauka [in Russian].
9. Krivtsun, I.V. (2018) Anode processes in welding arcs. *The Paton Welding J.*, **11–12**, 91–104.
10. Leskov, G.I. (1970) *Electric welding arc.* Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
11. Leskov, G.I., Lugin, V.P. (1971) Investigation of voltage breakdown of gaps between welding electrodes. *Svarochn. Proizvodstvo*, **2**, 10–11 [in Russian].
12. Makhlin, N.M. (2015) Peculiarities of contactless ignitions of alternating current arc. *The Paton Welding J.*, **10**, 29–35.
13. Weinshehk, H.E., Schellhase, M. (1971) Wiedezundugscharakteristiken von Schweißlichtbogen mit abschmelzen der Elektrode. *ZIS-Mitt.*, **13**(**12**), 1706–1720.
14. Korotynskyi, O.E. (2007) *High-efficient power sources for arc welding on the base of inductive-capacitive transducers.* In: Syn. of Thesis for Dr. of Tech. Sci. Degree. Kyiv [in Ukrainian].
15. Pokhodnya, I.K. (1967) *Electrode melting and interaction of metal with gases in arc welding.* In: Syn. of Thesis for Dr. of Tech. Sci. Degree. Kiev [in Russian].

PROCESSES OCCURRING AT EXCITATION OF THE WELDING ARC (Review)

N.M. Makhlin

SC «REC WCPE of the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine». 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: electro@paton.kiev.ua

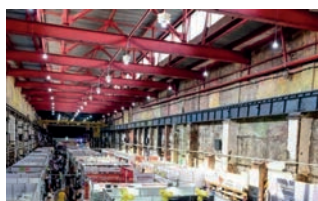
In view of the absence so far of a complete theory of the process of welding arc excitation, which could provide a convincing explanation of the entire totality of the known facts, some important theoretical and experimental data of different authors are considered as regards the processes of primary excitation of the welding arc in arc and plasma welding which is important for designing electronic boosting devices, which generate pulses of high and higher voltage that are injected into the inter-electrode gap to ensure contactless primary and repeated excitations of the welding arc. Requirements to pulse parameters that are generated by these devices are given, which are obtained on the base of many investigations (including theoretical studies), experience of development and application of booster devices. Analytical expressions are proposed to create the theory of the process of d.c. welding arc excitation. 15 Ref.

Key words: welding arc excitation at arc and plasma welding, glowing, spark and arc discharges, primary ignition voltage, repeated excitations of a.c. arc, combined devices - exciters-stabilizers, energy, amplitude, pulse duration

Надійшла до редакції 10.08.2020

**«Kharkiv PromDays 2020»
28-30 ЖОВТНЯ 2020**

Єдина промислова подія в Україні, що привертає увагу всіх фахівців машинобудівельної та енергетичної галузі.



«Арт-завод МЕХАНІКА»: Харків, вул. Плеханівська, 126, метро «Завод ім. Малишева» (057) 756-20-48, (067) 579-64-47 E-mail: info@adt.com.ua www.adt.com.ua