

ВПЛИВ ПРОГИНУ ПОВЕРХНІ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ВАННИ НА УМОВИ ГОРІННЯ ДУГИ З ТУГОПЛАВКИМ КАТОДОМ

І.В. Кривцун, І.В. Крикент, В.Ф. Демченко

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

Описано результати математичного моделювання аргонової дуги з тугоплавким катодом за наявності деформованої поверхні зварювальної ванни (анода дуги). Вважається, що на поверхні анода існує заглиблення (лунка), форма і розміри якого є заданими; дугова плазма має осьову симетрію і знаходиться у стаціонарному стані; випаровування металу з поверхні анода нехтується. Стисло описано математичну модель процесів перенесення енергії, імпульсу, маси і заряду в плазмі стовпа та анодної області дуги. Проведено чисельне дослідження теплових, електромагнітних і газодинамічних процесів у стовпі дуги з викривленою поверхнею анода, а також умов електричної, теплової та силової взаємодії дуги з анодною поверхнею залежно від глибини лунки. Результати обчислювальних експериментів ілюструються полями ізотерм, ізобар і струмових ліній в дузі з викривленою поверхнею анода, які порівнюються з аналогічними полями у випадку анода з плоскою поверхнею. Описано методику розрахунку нормальних компонентів векторів щільності електричного струму та питомого теплового потоку в анод, що має викривлену поверхню, а також наведено результати розрахунку радіальних розподілів цих характеристик залежно від глибини лунки на поверхні анода. Ці результати доповнюються чисельними дослідженнями впливу глибини лунки на розподіл тиску дуги на поверхні анода. Зроблено висновок, що прогин поверхні зварювальної ванни в умовах ТПГ зварювання може істотно змінювати умови електричної та теплової взаємодії дуги зі зварюваним металом, а саме впливати на теплові та гідродинамічні процеси у рідкому металі, які визначають проплавлення здатність дуги з тугоплавким катодом. Бібліогр. 29, рис. 8.

Ключові слова : ТПГ зварювання, стовп дуги, анодна область, поверхня зварювальної ванни, анод, щільність електричного струму, питомий тепловий потік в анод, математичне моделювання

Вступ. Технологічні результати ТПГ зварювання багато в чому визначаються умовами взаємодії електричної дуги з поверхнею металу, що зварюється. До таких умов відносяться: розподіли питомого теплового потоку, щільності електричного струму, газодинамічного тиску і напруження в'язкого тертя дугової плазми на поверхні зварювальної ванни, які в свою чергу визначають теплові, електромагнітні та гідродинамічні процеси в зварюваному металі і, відповідно, глибину та форму його проплавлення.

Дослідженням плазми стовпа і анодної області електричної дуги з тугоплавким катодом, у тому числі умов її взаємодії з поверхнею анода, залежно від струму, довжини дуги, форми та розмірів катода, складу та тиску захисного газу, присвячено значну кількість робіт [1–14]. При експериментальному дослідженні розподілів щільності електричного струму та питомого теплового потоку на поверхні анода в [1, 6, 10] був використаний метод розрізного водоохолоджуваного анода, робоча поверхня якого є плоскою. При проведенні спектрометричних вимірювань температури дугової плазми в [3, 7] і зондових вимірювань електронної температури та потенціалу плазми в анодній області дуги [5] також використовувався водоохолоджуваний анод з плоскою поверхнею. Теоретичні дослідження і чисельне моделювання процесів у стовпі та анодному шарі дуги з тугоплавким ка-

тодом, виконані в [2–4, 7–9, 11–14], проводилися з припущенням, що температура поверхні анода не перевищує температуру плавлення його матеріалу, а сама поверхня є плоскою. Отримані таким чином результати не дозволяють повною мірою враховувати вплив деформації поверхні зварювальної ванни та її температури на теплові, газодинамічні та електромагнітні характеристики дугової плазми, а також на процеси в металі, що зварюється дугою з неплавким електродом.

Дослідженню впливу на зазначені характеристики температури поверхні анода, у тому числі випаровування його матеріалу в дугову плазму, присвячено статті [15–21]. У більшості подібних теоретичних робіт (див., наприклад, огляди [17, 18] та цитовану в них літературу) поверхня анода (зварювальної ванни) також вважається плоскою, а розподіл температури цієї поверхні знаходиться або розрахунковим шляхом з використанням різних моделей процесів, що протікають у тілі анода [15–19], або задається *a priori* [20, 21].

В умовах ТПГ зварювання тиск швидкісного напорі дугової плазми на поверхню зварюваного металу може істотно (залежно від струму та довжини дуги) деформувати поверхню розплаву. У цьому випадку розподіл нормальних компонентів щільності електричного струму та питомого теплового потоку в анод, а також розподіл газодинамічного тиску

Кривцун І.В. – <https://orcid.org/0000-0001-9818-3383>, Крикент І.В. – <https://orcid.org/0000-0002-4196-6800>

© І.В. Кривцун, І.В. Крикент, В.Ф. Демченко, 2023

дугової плазми вздовж поверхні зварювальної ванни можуть істотно відрізнятись від тих, які визначаються в ході натурних або чисельних експериментів для анода з плоскою поверхнею. Зрештою це може призводити до зміни теплової та гідродинамічної обстановки в рідкому металі і, як наслідок, впливати на проплавляючу здатність дуги при ТПГ зварюванні.

Роботи, присвячені моделюванню фізичних процесів при зварюванні стиснутою (плазмовою) дугою та дугою, що вільно горить, з урахуванням деформації вільної поверхні зварювальної ванни з'явилися нещодавно [22–24]. У цих роботах для опису комплексу фізичних процесів, які протікають у стовпі та анодній області дуги, а також процесів у зварюваному металі, використовується єдина математична модель. Такий підхід дозволив здійснити моделювання процесу точкового ТПГ зварювання при високих значеннях струму дуги [23], тобто в умовах, коли деформація поверхні зварювальної ванни виявляється істотною, та дослідити процеси плазмового зварювання в режимі глибокого проплавлення (keyhole) при точковому [22] та лінійному [24] зварюванні стиснутою дугою. Разом з тим єдина математична модель, яка використовується авторами [22–24], не дозволяє повною мірою врахувати специфіку анодних процесів, для опису яких у зазначених роботах використовується дифузійне наближення для плазми анодного шару, яка вважається ізотермічною (локально-термічно-рівноважною) [25].

Тому дану роботу присвячено комп'ютерному моделюванню процесів перенесення енергії, імпульсу, маси і заряду в плазмі стовпа та анодній області аргонової дуги атмосферного тиску з тугоплавким катодом і анодом з викривленою по-

верхнею на основі самоузгодженої математичної моделі, яку було запропоновано в [11, 12], використано та верифіковано в [13]. Шляхом обчислювального експерименту досліджуються як розподілені характеристики дугової плазми, так і умови її взаємодії з викривленою поверхнею анода.

Умови обчислювального експерименту. Найбільш адекватний опис процесу ТПГ зварювання з урахуванням деформації поверхні зварювальної ванни має ґрунтуватися на спряженій моделі, яка описує теплові, електромагнітні, газо/гідродинамічні процеси в системі «дугова плазма–анодний шар–метал, що зварюється». Комп'ютерна реалізація такої моделі пов'язана зі значними труднощами та потребує значних обчислювальних ресурсів. У цій роботі для дослідження впливу деформації поверхні зварювальної ванни на умови горіння аргонової дуги з тугоплавким катодом використовується наближений підхід, який базується на наступних положеннях:

1. Деформована поверхня зварювальної ванни апроксимується осесиметричним заглибленням на поверхні анода. Форма цього заглиблення (лунки) передбачається незмінною в часі та *a priori* заданою як поверхня обертання з твірною, яка описується рівнянням $z = ar^2$. У цьому виразі координата z відраховується від денця лунки; $a = L/R^2$, де L , R — глибина та радіус лунки на поверхні (рис. 1).

2. Вважається, що процеси перенесення енергії, імпульсу, маси та заряду в дуговому розряді є стаціонарними, а розподіли характеристик дугової плазми є осесиметричними.

3. Для опису процесів перенесення енергії, імпульсу, маси і заряду в плазмі стовпа та анодного шару дуги використовується самоузгоджена математична модель [11–13], яка включає дві взаємопов'язані моделі:

– модель стовпа дуги, що описує теплові, електромагнітні та газодинамічні процеси в плазмі стовпа, яка вважається квазінейтральною, ізотермічною та іонізаційно рівноважною;

– модель анодного шару, що описує процеси в прианодній плазмі з урахуванням її термічної та іонізаційної нерівноважності, а також наявності поблизу поверхні анода шару просторового заряду, і дозволяє сформулювати граничні умови на границі плазми стовпа дуги з анодною областю та обчислити розподілені характеристики теплової, газодинамічної та електромагнітної взаємодії дугової плазми з поверхнею анода.

4. Випаровування металу з поверхні анода не приймається до уваги, що справедливо, наприклад, для сталюого анода, якщо максимальна температура його поверхні не перевищує 2400 К [20].

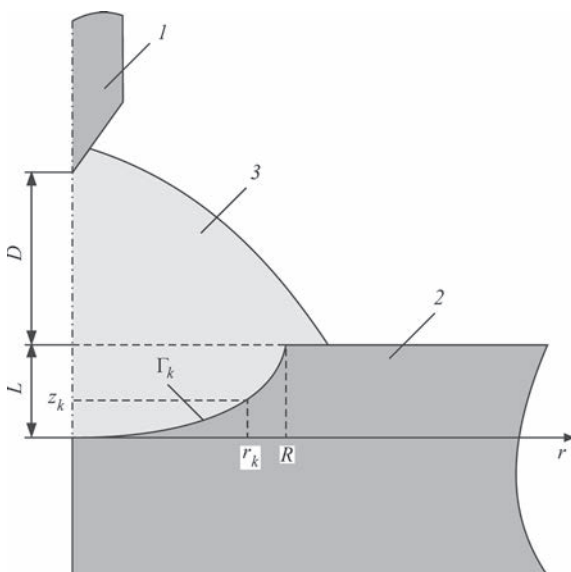


Рис. 1. Схематичне зображення системи «дуга–анод»: 1 — тугоплавкий катод; 2 — анод; 3 — дуга

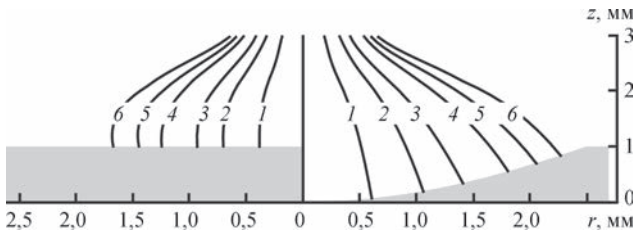


Рис. 2. Струмові лінії в стовпі дуги: 1 — $i = 10$; 2 — 30; 3 — 50; 4 — 80; 5 — 100; 6 — 120 А

Чисельна реалізація математичної моделі [11, 12] здійснювалася на прямокутній сітці методом кінцевих різниць з використанням сумісного лагранжевої-ейлерового (Lagrange–Euler) методу [26], адаптованого до умов стисливого середовища. У сітковій області границя між плазмою і металом апроксимувалася ступінчастою лінією. Розглядалася аргонова дуга завдовжки $D = 2$ мм (відстань від катода до невикривленої поверхні анода, див. рис. 1) при струмі $I = 200$ А. Для визначення термодинамічних і транспортних властивостей, а також втрат енергії на випромінювання аргонової плазми атмосферного тиску в залежності від температури використовувалися розрахункові дані з [27, 28].

У ході математичного моделювання розраховувалися розподіли теплових, електромагнітних і газодинамічних характеристик плазми в стовпі дуги, а також розподілені характеристики взаємодії дуги з поверхнею анода в залежності від глибини лунки на цій поверхні. При проведенні обчислювальних експериментів покладалося $R = 2,5$ мм, а величина L варіювалася в інтервалі $0 \dots 1,4$ мм.

Результати моделювання. У якості характерного значення глибини лунки на поверхні анода виберемо $L = 1$ мм і прослідкуємо, як кривизна поверхні анода впливає на електромагнітні, теплові та газодинамічні процеси в дуговій плазмі. На рис. 2–4 представлено струмові лінії, ізотерми та ізобари надлишкового тиску Δp у плазмі стовпа дуги, розраховані для плоскої (на рис. ліворуч) та викривленої (на рис. праворуч) поверхні анода. Під струмовими лініями розуміються твірні поверхонь обертання, що обмежують області дугової плазми, через які протікає задана частина i повного електричного струму дуги I .

Викривлення поверхні анода істотно змінює характер протікання струму та теплову і газодинамічну обстановку в стовпі дуги. Прогин поверхні найбільше впливає на характеристики дугового розряду поблизу анода і продовжує даватися знаки в середині міжелектродного проміжку. У прикатодній області характеристики дуги мало відрізняються від випадку анода з плоскою поверхнею. Цей висновок, який впливає з аналізу полів на рис. 2–4, підкріпимо результатами розрахунку

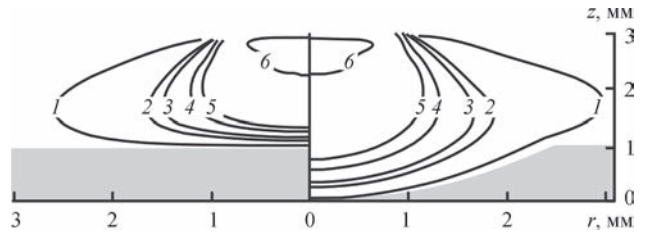


Рис. 3. Поле температур плазми стовпа дуги: 1 — $T = 13$; 2 — 17; 3 — 18; 4 — 20; 5 — 21; 6 — 25 К

струмових характеристик у двох перерізах стовпа дуги: у площині невикривленої поверхні анода (рис. 5, а); у площині, розташованій над цією поверхнею на відстані $0,5$ мм (рис. 5, б).

Визначемо розподіли нормальних компонентів векторів щільності електричного струму j_{an} і питомого теплового потоку q_{an} на викривленій поверхні анода, які потрібні при моделюванні теплових, гідродинамічних та електромагнітних процесів у зварюваному металі з урахуванням деформації вільної поверхні зварювальної ванни. При чисельному розрахунку вектори щільності струму та питомого теплового потоку в анод вздовж ступінчастої сіткової границі, яка апроксимує викривлену поверхню анода Γ , мають складові як в аксіальному, так і в радіальному напрямках (на горизонтальних лініях сітки — аксіальні компоненти, на вертикальних — радіальні). Це ускладнює обчислення нормальних до зазначеної поверхні компонентів відповідних векторів.

Для визначення розподілів j_{an} і q_{an} на викривленій поверхні анода скористаємося наступною методикою. Нехай Γ_k — відрізок твірної поверхні лунки, який починається від її денця та завершується деякою точкою з координатами $\{r_k, z_k\}$ на твірній Γ лунки (див. рис. 1). Позначимо через $I_a(r_k) = 2\pi \int_{\Gamma_k} j_{an}(s)r(s)ds$ — електричний струм, що витікає в плазму через частину криволінійної поверхні анода з твірною Γ_k і, відповідно, $Q_a(r_k) = 2\pi \int_{\Gamma_k} q_{an}(s)r(s)ds$ — тепловий потік, що поступає в анод через вказану поверхню, де s — поточна довжина дуги твірної Γ .

Наближено покладемо:

$$j_{an}(r_k) \approx [(\tilde{I}_a(r_{k+1}) - \tilde{I}_a(r_k))] / S_k; \quad (1)$$

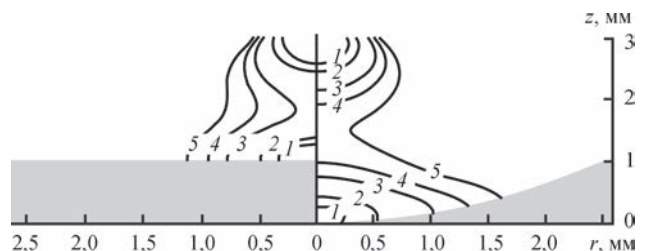


Рис. 4. Поле ізобар надлишкового тиску в стовпі дуги: 1 — $\Delta p = 800$; 2 — 700; 3 — 500; 4 — 400; 5 — 300 Па

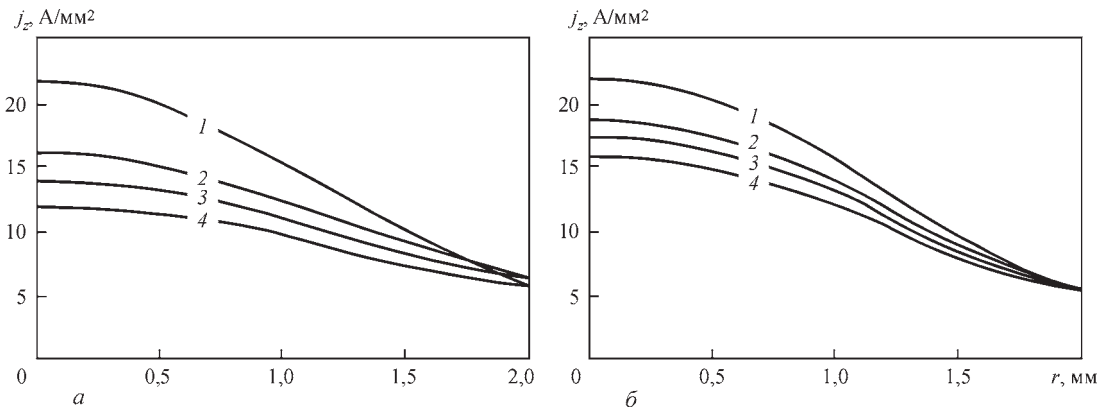


Рис. 5. Радіальний розподіл аксіальної компоненти щільності струму в двох перерізах стовпа дуги при різних значеннях L : 1 — $L = 0$; 2 — 0,7; 3 — 1,0; 4 — 1,4 мм

$$q_{an}(r_k) \approx [(\tilde{Q}_a(r_{k+1}) - \tilde{Q}_a(r_k))] / S_k, \quad (2)$$

де $j_{an}(r_k)$, $q_{an}(r_k)$ — середні значення нормальних до викривленої поверхні анода компонент щільності струму та питомого теплового потоку на відрізку $\Delta\Gamma_k$ твірної між перерізами лунки $z = z_k$ і $z = z_{k+1}$; $S_k = 2\pi \int_{\Delta\Gamma_k} r(s) ds$ — площа поверхні тіла обертання з твірною $\Delta\Gamma_k$, а $\tilde{I}_a(r_k)$ і $\tilde{Q}_a(r_k)$ є суматорними аналогами розподілів $I_a(r)$ і $Q_a(r)$ відповідно.

Розрахунок $\tilde{I}_a(r_k)$, $\tilde{Q}_a(r_k)$ здійснювався шляхом чисельного інтегрування дискретних значень щільності електричного струму та питомого тепло-

вого потоку вздовж всіх (як горизонтальних, так і вертикальних) ділянок ломаної сіткової границі Γ_k . Слід зауважити, що при чисельному розв'язанні рівнянь моделі на прямокутній сітці сіткові значення струму та теплового потоку, які визначаються вздовж ламаної сіткової границі, набувають невеликих осциляцій. Для їх усунення сіткові функції $\tilde{I}_a(r_k)$, $\tilde{Q}_a(r_k)$ на відрізку $0 \leq r \leq 2,5$ мм апроксимуються поліномами 3-го порядку, а отримані інтерполяційні залежності використовуються в (1), (2) при обчисленні нормальних компонент щільності електричного струму та питомого теплового потоку на викривленій поверхні анода.

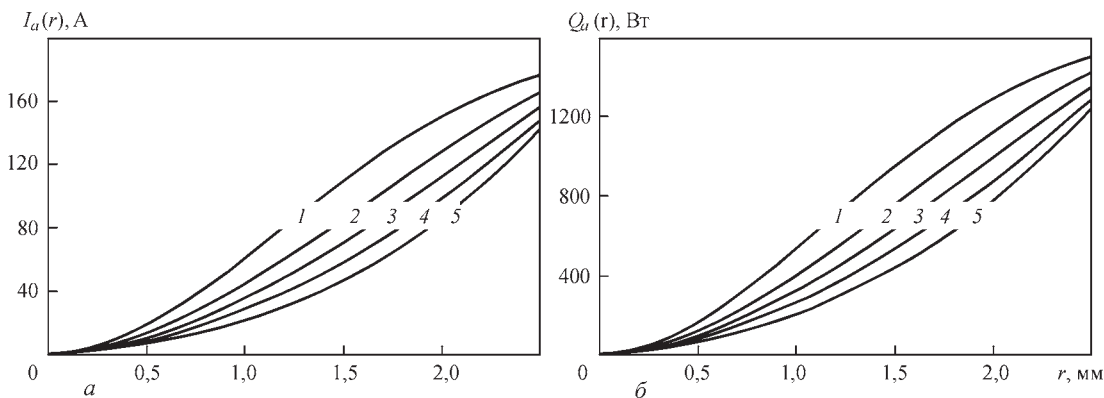


Рис. 6. Радіальні розподіли електричного струму (а) і теплового потоку (б) через викривлену поверхню анода: 1 — $L = 0$; 2 — 0,4; 3 — 0,7; 4 — 1,0; 5 — 1,4 мм

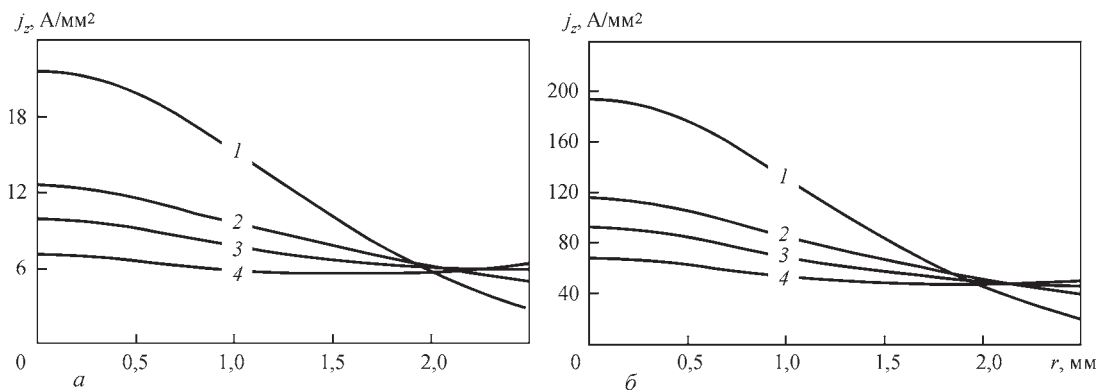


Рис. 7. Радіальні розподіли нормальних компонент векторів щільності струму (а) та питомого теплового потоку (б) на поверхні анода: 1 — $L = 0$; 2 — 0,7; 3 — 1,0; 4 — 1,4 мм

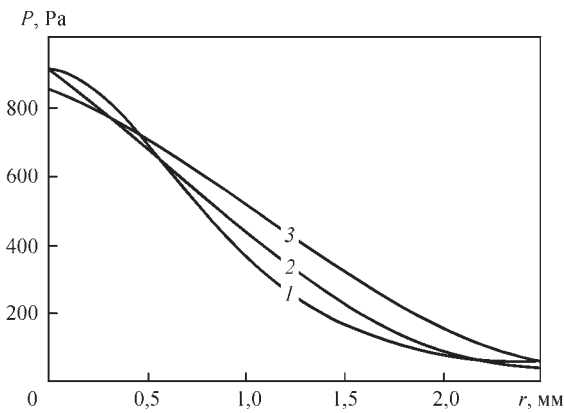


Рис. 8. Тиск дугової плазми на викривлену поверхню анода: 1 — $L = 0$; 2 — 0,4; 3 — 1,0 мм

Розраховані таким чином радіальні розподіли величин $I_a(r)$ і $Q_a(r)$ в лунці на поверхні анода показано на рис. 6. Відповідні розподіли $j_{an}(r)$, $q_{an}(r)$ для аргонної дуги з тугоплавким катодом та анодом з деформованою поверхнею представлено на рис. 7.

Зі збільшенням прогину лунки зростає площа поверхні анода, яка взаємодіє з дуговою плазмою. У результаті обидва ці параметри, що є відповідальними за електричну та теплову взаємодію дуги з анодом, який має викривлену поверхню, зменшуються зі збільшенням стрілки прогину цієї поверхні. Змінюється також характер їх розподілу вздовж анодної поверхні.

На відміну від щільності струму на аноді та питомого теплового потоку в анод (див. рис. 7) розподіл тиску вздовж викривленої поверхні анода незначно залежить від величини прогину його поверхні (рис. 8). Зазначимо, що газодинамічний тиск, розрахований методом математичного моделювання, є надлишковим у порівнянні з атмосферним і включає дві складові: магнітний тиск і тиск швидкісного напору дугової плазми, який виникає в результаті дії непотенційної складової сили Лоренца [29].

Висновки

При ТІГ зварюванні на прямій полярності:

1. Вплив деформації поверхні зварювальної ванни на теплові, електричні та газодинамічні характеристики дугової плазми найбільш позначається в тій частині стовпа дуги, яка віддалена від площини поверхні зварюваного металу на відстань, що є співставною з величиною стрілки прогину поверхні ванни, і слабшає при наближенні до катоду.

2. Деформація вільної поверхні зварювальної ванни може призводити до істотної зміни умов теплової, електричної та динамічної взаємодії дуги з металом, що зварюється, у порівнянні з випадком, коли ванна має плоску поверхню. Залежно від величини стрілки прогину поверхні ванни осьові значення нормальних компонент щільності електричного струму та питомого теплового потоку дуги на поверхні зварювальної ванни можуть зменшуватися в два і більше разів. Тиск, який чинить потік дугової плазми на поверхню зварю-

вальної ванни, незначно залежить від величини деформації її поверхні.

3. Вплив деформації поверхні ванни на проплавляючу здатність дуги полягає не лише в тому, що джерело тепла занурюється вглиб зварюваного металу, але також і в корінній зміні гідродинамічних потоків у зварювальній ванні у порівнянні з тими, які прогножуються моделями, що не враховують прогин поверхні ванни. При деформації поверхні ванни значних змін зазнають характеристики електромагнітного поля в зварюваному металі, які визначають величину та розподіл сили Лоренца – важливого силового фактору, що впливає на гідродинамічні процеси в зварювальній ванні та конвективне перенесення тепла в розплавленому металі.

Список літератури/References

1. Nestor, O.H. (1962) Heat intensity and current density distributions at the anode of high current, inert gas arcs. *J. Appl. Phys.*, 33(5), 1638–1648. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1728803>
2. Dinulescu, H.A., Pfender, E. (1980) Analysis of the anode boundary layer of high intensity arcs. *J. Appl. Phys.*, 51(6), 3149–3157. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.328063>
3. Hsu, K.C., Etemadi, K., Pfender, E. (1983) Study of the free-burning high-intensity argon arc. *J. Appl. Phys.*, 54(3), 1293–1301. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.332195>
4. Hsu, K.C., Pfender, E. (1983) Two-temperature modeling of the free-burning high-intensity arc. *J. Appl. Phys.*, 54(8), 4359–4366. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.332672>
5. Sanders, N.A., Pfender, E. (1984) Measurement of anode falls and anode heat transfer in atmospheric pressure high intensity arcs. *J. Appl. Phys.*, 55(3), 714–722. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.333129>
6. Tsai, N.S., Eagar, T.W. (1985) Distribution of the heat and current fluxes in gas tungsten arcs. *Metall. Trans. B*, 16, 841–846. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02667521>
7. Schmidt, H.P., Speckhofer, G. (1996) Experimental and theoretical investigation of high-pressure arcs: Part I. The cylindrical arc column (two-dimensional modelling). *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 24(4), 1229–1238. DOI: <https://doi.org/10.1109/27.536570>
8. Jenista, J., Heberlein, J.V.R., Pfender, E. (1997) Numerical model of the anode region of high-current electric arcs. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 25(5), 883–890. DOI: <https://doi.org/10.1109/27.649585>
9. Goodarzi, M., Choo, R., Toguri, J.M. (1997) The effect of the cathode tip angle on the GTAW arc and weld pool: I. Mathematical model of the arc. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 30, 2744–2756. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/30/19/013>
10. Füssel, U., Schnick, M., Munoz, J.E.F., Zschetsche, J., Siewert, E. (2007) Experimentelle Möglichkeiten der WSG-Lichtbogenanalyse. *Schweißen und Schneiden*, 59(7–8), 396–403.
11. Krivtsun, I., Demchenko, V., Lesnoi, A., Krikent, I., Mokrov, O., Reising, U., Zabirov, A., Pavlyk, V. (2009) Model of heat, mass- and charge-transfer in welding arc column and anode region. *Proc. of the 9th Int. Seminar «Numerical Analysis of Weldability»*, Graz-Seggau, Austria, 2009.
12. Кривцун І.В., Демченко В.Ф., Крикент І.В. (2010) Модель процессов тепло-, массо- и электропереноса в анодной области и столбе сварочной дуги с тугоплавким катодом. *Автомат. сварка*, 6, 3–11.
13. Krivtsun, I.V., Demchenko, V.F., Krikent, I.V. (2010) Model of the processes of heat-, mass- and charge transfer in the anode region and column of the welding arc with refractory cathode. *The Paton Welding J.*, 6, 2–9.
14. Кривцун І.В., Крикент І.В., Демченко В.Ф. (2012) Моделирование процессов тепло-, массо- и электропереноса

- в столбе и анодной области дуги с тугоплавким катодом. *Автомат. сварка*, **3**, 7–11.
- Krivtsun, I.V., Demchenko, V.F., Krikent, I.V. (2010) Model of the processes of heat-, mass- and charge transfer in the anode region and column of the welding arc with refractory cathode. *The Paton Welding J.*, **6**, 2–9.
14. Semenov, I.L., Krivtsun, I.V., Reisgen, U. (2016) Numerical study of the anode boundary layer in atmospheric pressure arc discharges. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **49**, 105204 (12 pp). DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/10/105204>
 15. Lago, F., Gonzalez, J.J., Fretton, P., Gleizes, A. (2004) A numerical modelling of an electric arc and its interaction with the anode: Part I. The two-dimensional model. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **37**, 883–897. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/37/6/013>
 16. Yamamoto, K., Tanaka, M., Tashiro, S., Nakata, K., Yamazaki, K., Yamamoto, E., Suzuki, K., Murphy, A.B. (2008) Metal vapour behaviour in gas tungsten arc thermal plasma during welding. *Sci. Technol. of Weld. Joining*, **13**(6), 566–572. DOI: <https://doi.org/10.1179/174329308X319235>
 17. Murphy, A.B., Tanaka, M., Yamamoto, K., Tashiro, S., Sato, T., Lowke, J.J. (2009) Modelling of thermal plasmas for arc welding: the role of the shielding gas properties and of metal vapour. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **42**, 194006 (20 pp). DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/19/194006>
 18. Murphy, A.B. (2010) The effect of metal vapour in arc welding. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **43**, 434001 (31 pp). DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/43/434001>
 19. Mougnot, J., Gonzalez, J.J., Fretton, P., Masquere, M. (2013) Plasma-weld pool interaction in tungsten inert-gas configuration. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **46**, 135206 (14 pp). DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/13/135206>
 20. Крикент І.В., Кривцун І.В., Демченко В.Ф. (2014) Моделирование электрической дуги с тугоплавким катодом и испаряющимся анодом. *Автомат. сварка*, **9**, 19–26. Krikent, I.V., Krivtsun, I.V., Demchenko, V.F. (2014) Simulation of electric arc with refractory cathode and evaporating anode. *The Paton Welding J.*, **9**, 17–24. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.09.02>
 21. Кривцун І.В., Демченко В.Ф., Крикент І.В., Коваленко Д.В., Коваленко І.В. (2019) Влияние тока и длины дуги на характеристики дугового разряда при сварке неплавящимся электродом. *Автомат. сварки*, **5**, 6–17. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2019.05.01>
 - Krivtsun, I.V., Demchenko, V.F., Krikent, I.V. et al. (2019) Effect of current and arc length on characteristics of arc discharge in nonconsumable electrode welding. *The Paton Welding J.*, **5**, 2–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.05.01>
 22. Jian, X., Wu, C.S. (2015) Numerical analysis of the coupled arc-weld pool-keyhole behaviors in stationary plasma welding. *Int. J. Heat Mass Transfer*, **84**, 839–847. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.069>
 23. Wang, X., Luo, Y., Fan, D. (2019) Investigation of heat and fluid flow in high current GTA welding by a unified model. *Int. J. Therm. Sci.*, **142**, 20–29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.04.005>
 24. Li, Y., Su, Ch., Wang, L., Wu Ch. (2020) A convenient unified model to display the mobile keyhole-mode arc welding process. *Appl. Sci.*, **10**, 7955 (17 pp). DOI: <https://doi.org/10.3390/app10227955>
 25. Lowke, J.J., Tanaka, M. (2006) «LTE-diffusion approximation» for arc calculations. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **39**, 3634–3643. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/16/017>
 26. Демченко В.Ф., Лесной А.Б. (2000) Лагранжево-эйлеровый метод численного решения многомерных задач конвективной диффузии. *Доп. НАН України*, **11**, 71–75. Demchenko, V., Lesnoi, A. (2000) Lagrange-Euler method of numerical solutions of multidimensional problems of convective diffusion. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, **11**, 71–75 [in Russian].
 27. Cressault, Y., Murphy, A.B., Teulet, Ph. et al. (2013) Thermal plasma properties for Ar-Cu, Ar-Fe and Ar-Al mixtures used in welding plasma processes: II. Transport coefficients at atmospheric pressure. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **46**, 415207 (27 pp). DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/41/415207>
 28. Essoltani, A., Proulx, P., Boulos, M.I. et al. (1994) Volumetric emission of argon plasmas in the presence of vapours of Fe, Si and Al. *Plasma Chem. and Plasma Proc.*, **14**(4), 437–450. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01570206>
 29. Демченко В.Ф., Кривцун І.В., Крикент І.В., Шуба І.В. (2017) Силовое взаимодействие тока дуги с собственным магнитным полем. *Автомат. сварка*, **3**, 20–30. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.03.03> Demchenko, V.F., Krivtsun, I.V., Krikent, I.V., Shuba, I.V. (2017) Force interaction of arc current with self-magnetic field. *The Paton Welding J.*, **3**, 15–24. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.03.03>

INFLUENCE OF WELD POOL SURFACE DEPRESSION ON BURNING CONDITIONS OF AN ARC WITH A REFRACTORY CATHODE

I.V. Krivtsun, I.V. Krikent, V.F. Demchenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: krivtsun@paton.kiev.ua

Results of mathematical modeling of an argon arc with refractory cathode in case of a deformed surface of the weld pool (arc anode) are described. It is assumed that there is a depression (crater) on the anode surface, the shape and size of which are preset; arc plasma has axial symmetry, and it is in a stationary state; metal evaporation from the anode surface is ignored. A mathematical model of the processes of energy, momentum, mass and charge transfer in the arc column and anode region is briefly described. A numerical study was conducted of thermal, electromagnetic and gas-dynamic processes in the arc column with a curved surface of the anode, as well as conditions of electric, thermal and force interaction of the arc with the anode surface, depending on the crater depth. Results of computational experiments are illustrated by the fields of isotherms, isobars and current lines in an arc with a curved surface of the anode, which are compared with similar fields in the case of an anode with a plane surface. A procedure for calculation of normal components of the vectors of electric current density and specific heat flux into the anode with a curved surface is described, and results of calculation of radial distributions of these characteristics, depending on the depth of the crater on the anode surface, are given. These results are complemented by numerical studies of the influence of the crater depth on arc pressure distribution over the anode surface. A conclusion was made that sagging of the weld pool surface in TIG welding can significantly change the conditions of electric and thermal interaction of the arc with the metal being welded, namely it can influence the thermal and hydrodynamic processes in the liquid metal, which determine the penetrability of the arc with the refractory cathode. 29 Ref., 8 Fig.

Keywords: TIG welding, arc column, anode region, weld pool surface, anode, electric current density, specific heat flux into the anode, mathematical modeling

Надійшла до редакції 24.06.2023