

ХАРАКТЕРИСТИКИ СТОВПА ДУГИ ПРИ TIG-ЗВАРЮВАННІ З ДІЄЮ ПОЗДОВЖНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ

О.Д. Размишляєв¹, М.В. Агєєва²

¹ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет». 87500, м. Маріуполь, вул. Університетська, 7.

E-mail: razmyshljaev@gmail.com

²Донбаська державна машинобудівна академія. 84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72. E-mail: maryna_ah@ukr.net

Розроблений пристрій, який дозволяє вводити зонд із вольфрамового дротика в плазму стовпа дуги при TIG-зварюванні. Робота пристрою полягала в тому, що металева струна діаметром в межах $(0,25 \dots 0,4) \cdot 10^{-3}$ м пружно деформувалась (закручувалась) при дії на неї крутильного моменту. При руху плазми стовпа дуги на зонд діяло зусилля напору, струна пружно деформувалась, і це дозволило встановити швидкість плазми стовпа дуги, що оберталась навколо її вісі при TIG-зварюванні при дії постійного поздовжнього магнітного поля. Дуга горіла між вольфрамовим електродом і мідною пластиною товщиною $6 \cdot 10^{-3}$ м на прямій полярності без перемішування електрода ($v_{зв} = 0$). Довжина дуги становила $4,0 \cdot 10^{-3}$ м. Встановлено, що при силі зварювального струму 200 А, збільшення індукції магнітного поля від 18 до 45 мТл призводить до збільшення азимутальної швидкості плазми стовпа дуги на відстані в межах $(3 \dots 4) \cdot 10^{-3}$ м від його вісі в межах від 17 до 20 м/год, а кутової швидкості обертання – в межах від 750 до 940 об/с. В роботі виконані зондування плазми стовпа дуги подвійним зондом при TIG-зварюванні із дією постійного поздовжнього магнітного поля. Зондами служили вольфрамові дротики діаметром $0,3 \cdot 10^{-3}$ м. За результатами вимірювань падіння напруги між зондами були встановлені значення поздовжньої і азимутальної щільності струму в заданій точці при TIG-зварюванні. Встановлено, що при рівні індукції магнітного поля в межах 18...45 мТл і струму дуги 200 А значення азимутальної компоненти щільності струму в стовпі дуги приблизно такі ж, як і значення поздовжньої компоненти щільності струму в стовпі дуги. Бібліогр. 14, рис. 6.

Ключові слова: TIG-зварювання, поздовжнє магнітне поле, індукція, щільність струму

Застосування поздовжнього магнітного поля (ПДМП) розширює технологічні можливості електродугового зварювання плавким електродом під флюсом і неплавким (вольфрамовим) електродом в середовищі захисних газів (частіше, в аргоні) [1, 2]. Процес TIG-зварювання доцільно застосовувати при зварюванні тонколистового металу, і при цьому перспективним є використання ПДМП. Але особливості TIG-зварювання з дією ПДМП недостатньо вивчені. В роботах [1, 3] показано, що при зварюванні з дією ПДМП значно зменшується глибина проплавлення металу. В роботах [1, 3–8] показано, що це обумовлено зменшенням тиску зварювальної дуги на рідкий метал під дугою, а також змінами розмірів активної плями дуги на виробі, що зварюється.

В роботах [1, 2, 6, 9] показано, що при TIG-зварюванні з дією постійного ПДМП стовп зварювальної дуги обертається навколо його поздовжньої вісі. В роботі [9] експериментально встановлено, що швидкість обертання стовпа дуги при дії постійного ПДМП, якщо $I_{зв} = 100$ А, а індукція $B = 5 \dots 10$ мТл, азимутальна швидкість досягає 30 м/год, а швидкість обертання стовпа дуги навколо його вісі складає 280 об/с. Але ці дані відносяться до процесу, коли використовували кільцевий анод. В роботах [10, 11] вивчали поведінку стовпа дуги при TIG-зварюванні роз-

рахунковим методом. Але одержані в цих роботах дані відносяться до дуги в аргоні між графітовими електродами діаметром 1,0 мм, струму $I_{зв}$ в межах 15...100 А, довжині дуги 20 мм, індукції ПДМП до 6 мТл. Ці дані не можуть бути застосовані для практичного процесу зварювання, коли використовують вольфрамовий дріт діаметрами 2...4 мм, а струм зварювання складає орієнтовно $I_{зв} = 100 \dots 300$ А.

Напрямок та швидкість обертання дуги при TIG-зварюванні в постійному ПДМП недостатньо вивчені. В роботі [1] дані, отримані швидкою кінозйомкою дуги в магнітному полі, мають якісний характер. Зокрема, в цій роботі сказано наступне: «дуга безінерційно прямує за зміною індукції поздовжнього магнітного поля». З цього випливає, що дуга обертається з частотою не менш 50 об/с. Обертання газоподібного провідника зі струмом в магнітному полі – це обертання заряджених частинок в електромагнітному полі. Однак, як зазначалося, напрямок цього обертання за уявленнями ряду дослідників суперечливо. За даними роботи [12] обертання дуги спрямовано в сторону руху позитивних іонів. В роботі [9] для дуги, що горить на кільцевому аноді, показано, що обертання плазми стовпа дуги при дії постійного ПДМП обумовлено тільки рухом електронів і направлено в сторону руху електронів. У зв'язку

Размишляєв О.Д. – <https://orcid.org/0000-0001-6616-7717>, Агєєва М.В. – <https://orcid.org/0000-0001-8275-6781>

© О.Д. Размишляєв1, М.В. Агєєва, 2021

з цим актуальним є дослідити напрямок і швидкість обертання дуги для процесу TIG-зварювання з дією постійного ПДМП. Ці дані можуть бути корисними для пояснення явищ, характерних для процесу проплавлення при дуговому зварюванні та наплавленні з дією ПДМП.

Метою даної роботи є визначення особливостей (характеристик) стовпа дуги при TIG-зварюванні з дією керуючого постійного ПДМП.

Для визначення напрямку і швидкості обертання стовпа дуги при TIG-зварюванні з дією постійного ПДМП використовували метод зондів і пристрій, наведений на рис. 1. В цьому випадку струну 5 закріплювали вертикально на опорах 6 для переміщення зонду 4 в горизонтальній площині. Зонд попередньо встановлювався перпендикулярно до напрямку пальника і паралельно поверхні пластини на певній відстані від неї. Дуга 2 горіла між вольфрамовим електродом 1 і мідною пластиною 3. Від лазерної вказівки 7 промінь падавав на дзеркальце 8, і відбившись від нього падавав на екран 9. Процес відхилення променя (зображення на екрані) при дії дуги 2 на зонд 4 знімали відеокамерою PANASONIC (з частотою 50 кадрів/с). Демпфер 10 служив для зменшення коливань зонда 4 при зварюванні.

При зварюванні застосовували вольфрамовий електрод марки ВЛ діаметром 4 мм, електрод заточували на конус з кутом в 90° (без притуплення). Експерименти показали, що при горінні дуги протягом 30 хв (достатній час для виконання серії експериментів) форма торця електрода (катода) практично не змінювалася. Для захисту дуги використовували аргон марки А (ГОСТ 10157-73), витрати якого складають 5...7 л/хв. Зварювання вольфрамовим електродом в аргоні здійснюва-

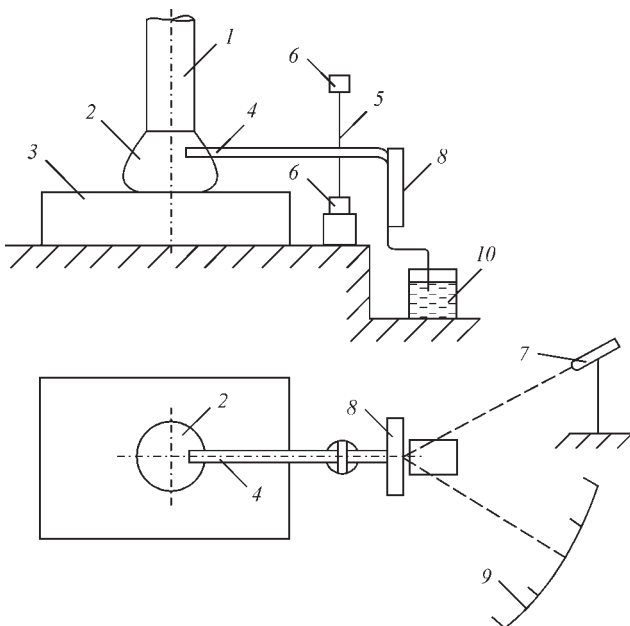


Рис. 1. Схема пристрою для вимірювання силового впливу стовпа дуги на зонд (позначення див. у тексті)

ли з закріплюваним пальником, в нижній частині якого співвісно з електродом кріпили соленоїд з феромагнітним осердям для створення ПДМП (на рис. 1 не показано). У якості джерела живлення використовували випрямляч типу ВСЖ-303. Для створення падаючої характеристики зварювального поста і регулювання зварювального струму застосовували баластні реостати типу РБ-301.

Зварювання виконували на режимі: $I_{зв} = 200$ А, $l_d = 4$ мм, $v_{зв} = 0$ м/год. У всіх експериментах використовували зонд 4 з вольфрамового дротика діаметром 1 мм.

Для визначення співвідношення між силою впливу дуги на зонд і відхиленням променя на екрані отримали тарувальні криві (при цьому до зонду підвішували гирьки). Для визначення зусилля плазми дуги на зонд, що вводився в зварювальну дугу, використовували отримані тарувальні криві.

При зварюванні відстань від торця електрода до виробу-пластини становила 4 мм. Перед зварюванням встановлювали торець зонду на відстані 1,5 мм до вісі дуги за схемою рис. 2. Зовнішній вигляд зонда в дузі, що горить в аргоні між вольфрамовим електродом і мідною пластиною при зварюванні і після гасіння дуги представлений на рис. 3.

Швидкість плазми дуги визначали наступним чином. По відхиленню променя на екрані і даними тарувального графіка визначали силу гідродинамічного напору плазми стовпа дуги на зонд F_p , Н

Розраховували силу гідродинамічного напору стовпа дуги на зонд F_p , Н. Оскільки

$$F = C_d S_3 \frac{\rho v^2}{2}, \quad (1)$$

то лінійна швидкість плазми стовпа дуги v , м/с:

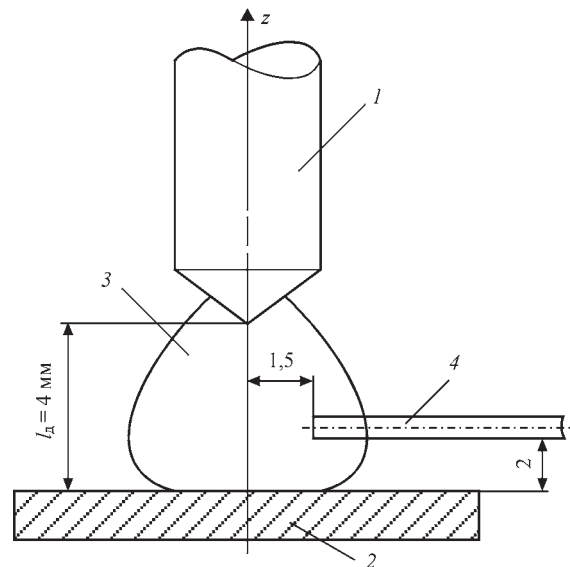


Рис. 2. Схема установки зонду при вимірюванні сили впливу дуги на зонд: 1 – електрод; 2 – виріб (пластина); 3 – дуга; 4 – зонд

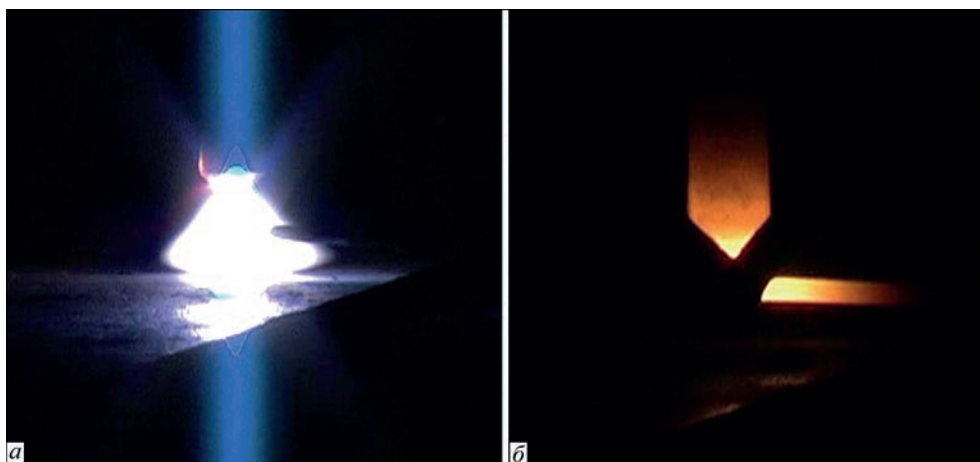


Рис. 3. Зовнішній вигляд розташування зонда в палаючій дузі (а) і після її виключення (б)

$$v = \sqrt{\frac{2F_3}{C_l S_3 \rho}}, \quad (2)$$

де $S_3 = ld$ – площа (лобової) частини зонда, зануреного в стовп дуги, m^2 ; l – довжина зануреної частини зонда, m ; d – діаметр зонда, m ; ρ – щільність аргону при $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, kg/m^3 , $\rho = 1,78 \cdot 10^{-3} \text{ } kg/m^3$; C_l – коефіцієнт лобового опору зонда.

В розрахунках використовували значення $C_l = 1,0$ [13, 14].

Встановлено, що при збільшенні індукції B_z постійного ПДМП при ТІГ-зварюванні тангенціальна (азимутальна) швидкість потоку плазми в дузі V_ϕ зростає від 17 до 20 м/год, а кутова швидкість обертання дуги складає близько 750...940 об/с (рис. 4). Ці дані отримані при врахуванні, що щільність газів зворотно пропорційна температурі. Приймаючи температуру зварювальної дуги $T_d = 12000 \text{ K}$, наведені дані про щільність аргону для формул (1), (2), зменшували у $\sqrt{T_d/T_0} = \sqrt{1200/300} \approx 6$ разів.

Напрямок обертання стовпа дуги при дії ПДМП завжди відповідав напрямку вектору сили

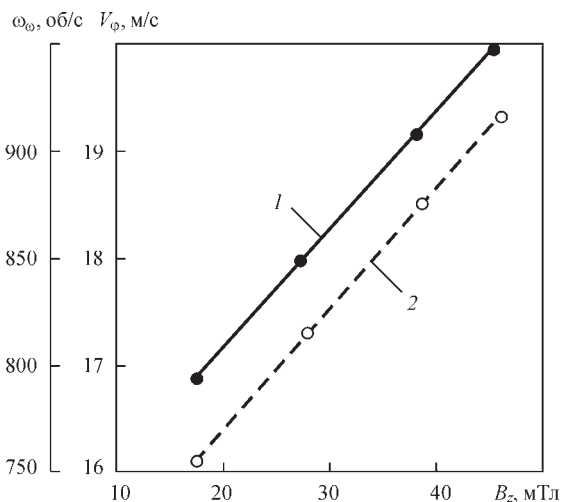


Рис. 4. Залежність азимутальної швидкості і кутової швидкості обертання стовпа дуги від індукції ПДМП: 1 – V_ϕ ; 2 – ω_ω ; $I_{зв} = 200 \text{ A}$; $l_d = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

від векторного добутку осьової складової індукції B_z ПДМП з радіальною складовою щільності струму в дузі j_r . Співпадання напрямку обертання стовпа зварювальної дуги навколо своєї вісі з напрямком обертання електронів в стовпі дуги можна пояснити таким чином. Згідно зі схемою, наведеною на рис. 5, лінії індукції B_z ПДМП направлені зверху вниз (рис. 5) вздовж вісі (вісі z по рис. 1). В поперечному перерізі зварювальної дуги мають місце радіальні компоненти щільності зварювального струму j_r (на рис. 5 показано, що ці вектори направлені від центру). Тоді за правилом лівої руки електрони в стовпі зварювальної дуги обертаються в напрямку, показаному лінією 1 на рис. 5, тобто проти часової стрілки. Напрямок переміщення кінця зонда (4) при проведенні експериментів завжди співпадав з вказаним напрямком. Обертання електронів в стовпі зварювальної дуги на рис. 5 показано лінією 1, а лінія 2 показує напрямок обертання плазми стовпа зварювальної дуги при дії постійного ПДМП, отриманий при про-

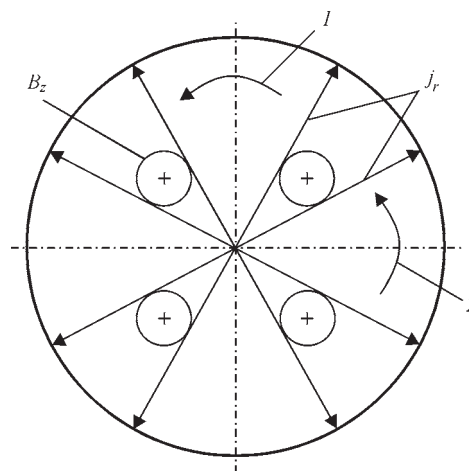


Рис. 5. Схема до визначення напрямку руху плазми стовпа дуги при ТІГ-зварюванні з дією постійного ПДМП (вид зверху на поперечний переріз зварювальної дуги на площу пластини (б) по рис. 1): j_z – радіальна компонента щільності струму в стовпі дуги; B_z – поздовжня компонента індукції ПДМП; 1 – напрямок руху електронів; 2 – напрямок переміщення кінця вольфрамового зонда (4)

веденні експериментів. Таким чином, обертання стовпа дуги при TIG-зварюванні з дією постійного ПДМП обумовлено рухом електронів.

Виконували експерименти з введенням в зварювальну дугу подвійного зонду. Для цього був виготовлений спеціальний пристрій. Зондами служили вольфрамові дрітки діаметром 0,3 мм, які розміщували в алундових ізоляторах зовнішнім діаметром 1,5 мм. Відстань між всіями дрітків становила $d = 1,5$ мм. Зварювання здійснювали без переміщення електрода ($v_{зв} = 0$). Утримувач зондів дозволяв розташовувати їх як перпендикулярно, так і паралельно вісі дуги. При зварюванні записували падіння напруги між зондами і параметри режиму зварювання $I_{зв}$, U_d . Для вимірювань значень ΔU_z подвійний зонд вводили в дугу так, що відстань нижньої поверхні зонда до виробу (мідної пластини) становила 1,0 мм (довжина дуги становила $l_d = 4$ мм). Для вимірювання значень ΔU_ϕ площину двох зондів розташовували так, щоб вона збігалася з горизонтальною площиною і перебувала на відстані 1 мм від виробу. Глибина введення зондів була такою, що торці зондів були на відстані 1,5 мм від вісі дуги.

Як показано в роботах [13, 14] подвійний зонд дозволяє не враховувати відому похибку, яка обумовлена додатковим потенціалом зонду щодо потенціалу стовпа дуги, оскільки вони віднімаються (невідомі негативні потенціали зондів, які обумовлені дифузією електронів з плазми на зонд). Крім того, оскільки провідність плазми σ однакова в одній і тій самій точці (або малої області) дуги, то за результатами вимірювань падіння напруги між зондами (ΔU_z або ΔU_ϕ) можна оцінити компоненти щільності струму в дузі за формулами

$$j_z = \frac{\Delta U_z}{d} \sigma; j_\phi = \frac{\Delta U_\phi}{d} \sigma \quad (d - \text{відстань між осями двох зондів, } \sigma - \text{електропровідність плазми стовпа дуги}).$$

В цьому випадку можна і не визначати значення σ для плазми дуги, а отримати співвідношення щільності струмів j_ϕ/j_z .

При зондуванні здійснювали відеозйомку дуги камерою PANASONIC з частотою 50 кадр/с. По зображеннях зондів на кадрах зйомки уточнювали їх положення в дузі.

Дані досліджень показали, що при збільшенні індукції постійного ПДМП параметр $E_\phi = \Delta U_\phi / d$ практично лінійно зростає (рис. 6, крива 2). При значеннях індукції $B_z = 30$ мТл значення E_ϕ досягає значень E_z і при подальшому зростанні B_z перевищує значення E_z (рис. 6, крива 1). При індукції $B_z = 15$ мТл співвідношення $E_\phi/E_z \approx 0,67$. Значення E_z практично не залежать від індукції B_z (рис. 6, крива 1) і становить величину порядку $E_z = 1$ В/мм. Слід зазначити, що співвідношен-

$E_z, E_\phi; \text{В/мм}; I_\phi/I_{зв}$

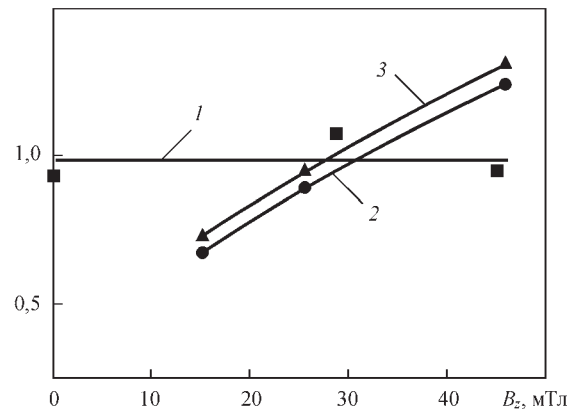


Рис. 6. Вплив індукції B_z постійного ПДМП на градієнти потенціалів стовпа дуги і співвідношення струмів $I_\phi/I_{зв}$ ($I_{зв} = 200$ А, $l_d = 4$ мм): 1 – E_z ; 2 – E_ϕ ; 3 – $I_\phi/I_{зв}$

ня E_ϕ/E_z є еквівалентним співвідношенню I_ϕ/I_z і ці співвідношення наведені на рис. 6, крива 3.

Таким чином, величина азимутальної щільності струму порівняна з величиною зварювального струму. Безумовно отримані дані в силу неточності даних про діаметр стовпа дуги і коефіцієнта лобового опору зонду при дії на нього плазми стовпа дуги слід вважати орієнтовними. Але ці встановлені факти необхідно враховувати при аналізі процесів в зварювальній дузі при дії ПДМП.

Висновки

1. При TIG-зварюванні з дією керуючого постійного ПДМП метод зондування стовпа дуги дозволив встановити, що при значенні зварювального струму дуги 200 А, довжині дуги $4 \cdot 10^{-3}$ м збільшення індукції магнітного поля від 18 до 45 мТл в точці на відстані від вісі дуги $(3...4) \cdot 10^{-3}$ м та $1,0 \cdot 10^{-3}$ м від основного металу (мідної пластини) азимутальна швидкість плазми стовпа дуги зростає від 17 до 20 м/год, а кутова швидкість його обертання – від 750 до 940 об/с.

2. Зондування плазми стовпа дуги подвійним зондом дозволило встановити, що при TIG-зварюванні з дією керуючого постійного ПДМП азимутальна складова щільності струму (при струмі дуги 200 А і довжині дуги $4,0 \cdot 10^{-3}$ м) може досягати значень поздовжньої компоненти щільності струму в стовпі зварювальної дуги.

Список літератури

1. Черныш В.П., Кузнецов В.Д., Брисман А.Н., Шеленков Г.М. (1983) *Сварка с электромагнитным перемешиванием*. Киев, Техника.
2. Размышляев А.Д., Выдмыш П.А., Агеева М.В. (2017) *Автоматическая электродуговая сварка под флюсом с воздействием внешнего магнитного поля*. Мариуполь, ГВУЗ «ПГТУ».
3. Размышляев А.Д. Миронова М.В., Дели А.А. (2009) Особенности проплавления металла при аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом в продольном магнитном поле. *Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб. наук. праць*, 19, сс. 185–187.

4. Hua, A., Yin, S., Chen, S. et al. (2010) Behavior of arc and drop transfer of mag welding controlled by longitudinal magnetic field. *Journal of Mechanical Engineering*. 46, 14, 95–100.
5. Yin, X., Gou, J., Ma, N. (2011) Numerical simulation of arc and weld pool for GTAW in external axial magnetic fields. *Transactions of JWRI, Special Issue on WSE 2011*, 17–27.
6. Кузнецов В.Д., Малинkin И.В., Сыроватка В.В. (1972) Поведение дуги и перенос электродного металла при сварке в продольном магнитном поле. *Сварочное производство*, 4, 3–4.
7. Размышляев А.Д., Миронова М.В., Дели А.А. (2008) Влияние продольного магнитного поля на характеристики дуги при сварке неплавящимся электродом в аргоне. *Автоматическая сварка*, 3, 21–25.
8. Селяненков В.Н., Блинков В.А., Казаков Ю.В. (1975) О формировании сварного шва в продольном магнитном поле при аргонодуговой сварке. *Сварочное производство*, 11, 5–7.
9. Гвоздецкий В.С., Мечев В.С. (1963) Исследование вращающейся в магнитном поле сварочной дуги постоянного тока (плоская и конусная дуга). *Автоматическая сварка*, 12, 1–6.
10. Урусов Р.М. (2003) Расчет электрической дуги в продольном магнитном поле. *Теплофизика высоких температур*, 41, 2, 181–188.
11. Урусов Р.М., Урусова И.Р. (2019) О механизме формирования винтовой формы электрической дуги во внешнем аксиальном магнитном поле. *Там же*, 57, 3, 328–337.
12. Биржев В.А., Болдырев А.М. (1982) О влиянии продольного магнитного поля на сварочную дугу прямой полярности. *Автоматическая сварка*. 1, 15–19.
13. Ленивкин В.А., Петров П.И., Дюржеров Н.Г. (1984) Определение скоростного напора плазмы сварочной дуги. *Сварочное производство*, 7, 3–4.
14. Ленивкин В.А., Дюржеров Н.Г., Сагиров Х.Н. (1989) *Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах*. Москва, Машиностроение.
2. Razмышlyayev, A.D., Vydmysh, P.A., Ageeva, M.V. (2017) *Automatic submerged-arc welding under impact of magnetic field*. Mariupol, PGTU [in Russian].
3. Razмышlyayev, A.D., Mironova, M.V., Deli, A.A. (2009) Peculiarities of metal penetration at tungsten electrode argon arc welding in longitudinal magnetic field. *Visnyk Pryazov. DTU*, 19, 185-187 [in Russian].
4. Hua, A., Yin, S., Chen, S. et al. (2010) Behavior of arc and drop transfer of MAG welding controlled by longitudinal magnetic field. *Journal of Mechanical Engineering*. 46, 14, 95–100.
5. Yin, X., Gou, J., Ma, N. (2011) Numerical simulation of arc and weld pool for GTAW in external axial magnetic fields. *Transact. of JWRI, Special Issue on WSE 2011*, 17–27.
6. Kuznetsov, V.D., Malinkin, I.V., Syrovatka, V.V. (1972) Behavior of arc electrode metal transfer in welding by longitudinal magnetic field. *Svarochn. Proizvodstvo*, 4, 3–4 [in Russian].
7. Razмышlyayev, A.D., Mironova, M.V., Deli, A.A. (2008) Effect of longitudinal magnetic field on characteristics of the arc in TIG welding in argon atmosphere. *The Paton Welding J.*, 3, 13-17.
8. Selyanekov, V.N., Blinkov, V.A., Kazakov, Yu.V. (1975) On weld formation in longitudinal magnetic field at argon arc welding. *Svarochn. Proizvodstvo*, 11, 5–7 [in Russian].
9. Gvozdetzky, V.S., Mechev, V.S. (1963) Investigation of magnetically-impelled dc welding arc (flat and conical). *Avtomatich Svarka*, 12, 1–6 [in Russian].
10. Urusov, R.M. (2003) Calculation of electric arc in longitudinal magnetic field. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*, 41(2), 181–188 [in Russian].
11. Urusov, R.M., Urusova, I.R. (2019) On mechanism of formation of helical shape electric arc in external axial magnetic field. *Ibid.*, 57(3), 328–337 [in Russian].
12. Birzhev, V.A., Boldyrev, A.M. (1982) About effect of longitudinal magnetic field on welding arc of straight polarity. *Avtomatich. Svarka*, 1, 15–19 [in Russian].
13. Lenivkin, V.A., Petrov, P.I., Dyurgerov, N.G. (1984) Determination of velocity head of welding arc. *Svarochn. Proizvodstvo*, 7, 3–4 [in Russian].
14. Lenivkin, V.A., Dyurgerov, N.G., Sagirov, Kh.N. (1989) *Technological properties of shielded-gas welding arc*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

References

CHARACTERISTICS OF ARC COLUMN DURING TIG WELDING WITH THE EFFECT OF LONGITUDINAL MAGNETIC FIELD

O.D. Razмышlyayev¹, M.V. Ahieieva²

¹SHEI «Priazov State Technical University», 7 Universitetskaya Str., 87500, Mariupol, E-mail: razмышlyayev@gmail.com

²Donbass State Mechanical Academy, 72 Akademicheskaya Str., 84413, Kramatorsk. E-mail: maryna__ah@ukr.net

A device was designed that allows inserting a tungsten dart probe into the plasma of arc column during TIG welding. The operation of the device envisaged that a metal string with a diameter in the range of $(0.25 \dots 0.4) \cdot 10^{-3}$ m was elastically deformed (twisted) under the action of torque. During the movement of the arc column plasma, the probe was subjected to a pressure force, the string was elastically deformed and this allowed establishing the velocity of the arc column plasma rotating around its axis during TIG welding under a constant longitudinal magnetic field. The arc burned between the tungsten electrode and a copper plate with a thickness of $6.0 \cdot 10^{-3}$ m on the direct polarity without mixing the electrode ($v_w = 0$). The length of the arc was $4.0 \cdot 10^{-3}$ m. It was found that at a welding current of 200 A, an increase in the induction of the magnetic field from 18 to 45 mT leads to an increase in the azimuthal velocity of the arc column plasma at a distance within $(3 \dots 4) \cdot 10^{-3}$ m from its axis in the range from 17 to 20 m/h, and the angular speed of rotation is in the range from 750 to 940 rps. The plasma probings of the arc column were performed with a double probe during TIG welding with the effect of a constant longitudinal magnetic field. In capacity of probes, tungsten darts with a diameter of $0.3 \cdot 10^{-3}$ m served. According to the results of measuring voltage drop, between the probes the values of longitudinal and azimuthal current densities at a set point during TIG welding were established. It was found that at the level of magnetic field induction within 18...45 mT and arc current of 200 A, the values of the azimuthal component of current density in the arc column are approximately the same as the values of the longitudinal component of current density in the arc column. 14 Ref., 6 Fig.

Keywords: TIG welding, longitudinal magnetic field, induction, current density

Надійшла до редакції 20.09.2021