

# ФОРМУВАННЯ ЗОНИ ПРОПЛАВЛЕННЯ ОСНОВНОГО МЕТАЛУ ПРИ ДУГОВОМУ НАПЛАВЛЕННІ З ДІЄЮ ПОЗДОВЖНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ

О.Д. Размишляєв<sup>1</sup>, М.В. Агєєва<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет». 87500, м. Маріуполь, вул. Університетська, 7.  
E-mail: razmyshljaev@gmail.com

<sup>2</sup>Донбаська державна машинобудівна академія. 84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72.  
E-mail: maryna\_ah@ukr.net

В роботі експериментально підтверджено припущення, що поздовжнє магнітне поле (ПДМП) при дуговому наплавленні під флюсом може чинити гальмуючу дію на швидкість руху рідкого металу в зварювальній ванні. Розрахунковим методом і фізичним моделюванням встановлені значення гальмуючого зусилля в залежності від швидкості руху електропровідних тіл при дії ПДМП. Виконані експерименти при дуговому наплавленні дротом під флюсом показали, що при дії як постійного, так і знакозмінного ПДМП частотою 50 Гц товщина прошарку рідкого металу в ванні під дугою збільшується приблизно в 1,5...2,0 рази. Це дозволяє зробити висновок, що факт зниження глибини проплавлення основного металу при наплавленні з дією ПДМП обумовлений гальмуючою дією магнітного поля на швидкість потоків рідкого металу в ванні, збільшенням за рахунок цього товщини прошарку рідкого металу під дугою і погіршенням ефективності передачі тепла дуги до основного металу. Бібліогр. 10, табл. 1, рис. 4.

*Ключові слова:* дугове наплавлення, поздовжнє магнітне поле, індукція, гальмування потоків, глибина проплавлення

**Вступ.** В роботах [1, 2] показано, що при дуговому зварюванні і наплавленні дротом під флюсом з дією поздовжнього магнітного поля (ПДМП) має місце значне зменшення глибини і площі проплавлення основного металу і частки основного металу у наплавленому. При GMAW і TIG-зварюванні з дією ПДМП [3–7] також відбувається зниження глибини проплавлення основного металу і це обумовлено зниженням зусилля плазми стовпа дуги на рідкий метал зварювальної ванни під дугою. В роботі [1] показано, що при дуговому наплавленні дротом Св-08ГА під флюсом АН-348А на пластини зі сталі ВМСтЗсп і дротом Св-06Х18Н9Т на пластини зі сталі 12Х18Н10Т під флюсом АН-20С з дією постійного і знакозмінного частотою 50 Гц ПДМП відбувається не тільки зменшення глибини проплавлення, але й форми контуру (обрису) цієї зони. Зроблено припущення, що при наплавленні з дією ПДМП зменшується тиск дуги на рідкий метал під дугою, збільшується товщина прошарку рідкого металу під дугою, що призводить до зменшення глибини проплавлення основного металу. В цій же роботі зроблено припущення, що зростання товщини прошарку рідкого металу під дугою може бути обумовлено тим, що при дії ПДМП гальмується рух рідкого металу з під дуги до хвостової частини зварювальної ванни. Але ці припущення не мають експериментального підтвердження.

Метою даної роботи є встановлення особливостей руху рідкого металу в зварювальній ванні при дуговому наплавленні плавким електро-

дом (дротом) з дією зовнішнього (керуючого) поздовжнього магнітного поля для встановлення причин його впливу на зниження глибини проплавлення і зміну форми зони проплавлення основного металу.

**Матеріали і методики.** В роботі [1] показано, що при дуговому наплавленні (зварюванні) з дією ПДМП в зварювальній ванні виникає сила, яка направлена зустрічно швидкості потоків рідкого металу. Ця сила діє як на рідкий метал, так і на метал в твердому стані. Для експериментального підтвердження гальмуючої дії ПДМП на рух електропровідних тіл виконаний пристрій для досліджень (рис. 1, а). Схема до розрахунку гальмуючої дії ПДМП представлена на рис. 1, б. Установка для досліджень представляла собою фізичний маятник. На жорстких нитках (мідних дротах діаметром 0,65 мм) (1) закріплювали диски (2) з припою марки ПОС-40. Розміри дисків з припоєм ПОС-40 становили: діаметр – 66 мм, товщина була у різних серіях різною та становила 1,5; 2,8 та 7 мм, при цьому вага цих дисків відповідно становила: 33,7; 67,44 і 126 г. Генерування ПДМП здійснювалось соленоїдом (3) з числом витків  $W = 144$ . Зазор між торцем цього соленоїда та масивною пластиною (4) з низьковуглецевої сталі (феромагнітної) товщиною 40 мм становив  $H = 30$  мм. Дротики (1) кріпили до шарикопідшипника (5). Розподіл індукції у цьому зазорі був досить рівномірним, хоча був незначний градієнт (зниження) індукції ПДМП у бік пластини (4).

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

© О.Д. Размишляєв, М.В. Агєєва, 2022

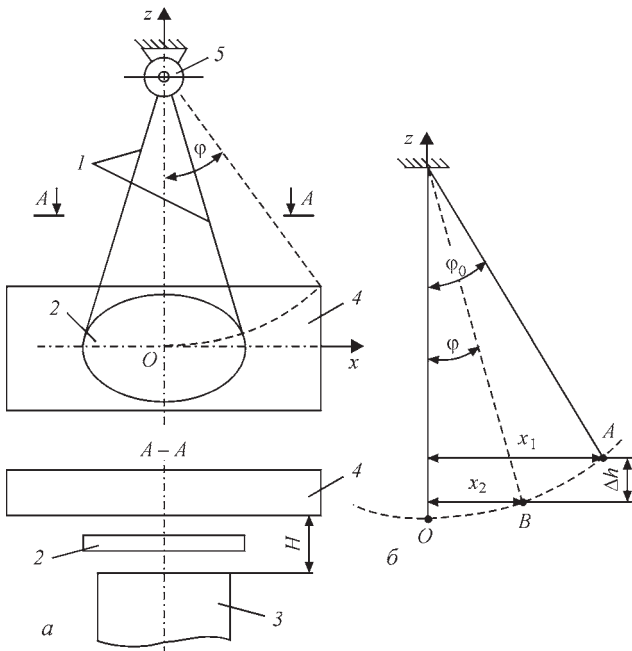


Рис. 1. Схема пристрою для досліджень (а) і схема до розрахунку (б) гальмуючої дії ПДМП на рух електропровідних тіл (позначення див. у тексті)

Необхідно було враховувати сили тертя в шарикопідшипнику (5), а також дротиків (1) і диска (2) о повітря. Для визначення (обчислення) сили гальмування, пов'язаної з дією ПДМП на досліджуваний диск (2), необхідно від загальної гальмуючої сили відняти зазначені вище сили, пов'язані з тертям у підшипнику та опором повітря.

Вирішували це завдання в такий спосіб. Оскільки період  $T$  за весь час коливань (аж до зупинки диска) є незмінною величиною [8], тоді шлях, що проходить центр тіла – диска (2) пропорційний числу коливань. Наприклад, в межах загасання амплітуди маятника від відстані  $x_1 = 6$  см до відстані  $x_2 = 3$  см (за  $n$  коливань) пройдений шлях становить (середні значення):

$$S_{cp} = 4 \frac{x_1 + x_2}{2} n. \quad (1)$$

*Розрахунки без дії ПДМП.* Тут діють лише сили опору  $F_{on} = X_1$ .

Приймемо, що кількість коливань, за які центр диска (2) зміститься на відстань від  $x_1$  до  $x_2 - n_1$ . Тоді робота сил тертя, що припадає на зміни відстані  $\Delta x$  (від  $x_1$  до  $x_2$ ) –  $x_1 n_1$ . Тобто зменшення при цьому потенційної енергії:

$$\Delta E_n = x_1 n_1. \quad (2)$$

*Розрахунки з дією ПДМП.* У цьому випадку діють дві сили:  $F_{on} + F_r$  ( $F_r$  – сила гальмування за рахунок дії ПДМП).

Нехай  $F_r = x_2$ , а число коливань центру диска у цьому випадку –  $n_2$  ( $n_2 < n_1$ ). Тоді робота сил тертя дорівнює  $x_1 n_2 + x_2 n_2$ . Тобто зменшення потенційної енергії у цьому випадку:

$$\Delta E_n = x_1 n_2 + x_2 n_2. \quad (3)$$

Тоді маємо систему рівнянь:

$$x_1 n_1 = \Delta E_n, \quad (4)$$

$$x_1 n_2 + x_2 n_2 = \Delta E_n. \quad (5)$$

З формули (4) отримуємо, що  $x_1 = \Delta E_n / n_1$ . Підставимо це значення  $x_1$  до рівняння (5), тоді отримаємо:

$$X_1 = \Delta E_n \frac{n_1 - n_2}{n_1 n_2} = \Delta E_n \frac{\Delta n}{n_1 n_2}, \quad (6)$$

де  $\Delta n = n_1 - n_2$ .

У цих міркуваннях у лівій частині рівнянь (4), (5) – робота сил тертя  $A$ , що припадає на зміни відстані  $\Delta x$  (від  $x_1$  до  $x_2$ ), або зниження центру ваги диска (2) на величину  $\Delta h$  (див. рис. 1, б).

При цьому  $A = F_r S_{cp} = P \Delta h = \Delta E_n$  і тоді:

$$F_r = \frac{P \Delta h}{S_{cp}} \cdot \frac{\Delta n}{n_1 n_2}. \quad (7)$$

З формули (7) виникає, що отриманий результат ( $F_r$ ) є функцією, яка залежить від ваги диска  $P$ , тобто  $F_r = f(P)$ . Проведені експерименти показали, що  $F_r$  від ваги  $P$  практично не залежить.

Дугове наплавлення здійснювали дротом Св-08ГА діаметром 4 мм під флюсом АН-348А на режимі:  $I_n = 700 \dots 750$  А,  $U_d = 32 \dots 33$  В,  $v_n = 27$  м/год і при значеннях індукції ПДМП 50, 100, 150 мТл.

**Експериментальні дослідження та результати.**

Виконували серії експериментів по встановленню значень гальмуючого зусилля при дії ПДМП з дією постійної величини індукції на різних швидкостях руху диска (рис. 1, поз. 2). При цьому значення швидкості обчислювали за формулою [8]:

$$V = \sqrt{2gl \Delta \cos \varphi}, \quad (8)$$

де  $\Delta \cos \varphi = \cos \varphi - \cos \varphi_0$ ;  $\varphi$  – поточний кут;  $\varphi_0$  – початковий кут (рис. 1, б).

Встановлено, що постійне та частотою 50 Гц ПДМП аналогічно впливає на  $F_r$  (рис. 2). Однак за інших рівних умов сила  $F_r$  при дії ПДМП частотою 50 Гц дещо менша, ніж при дії постійного ПРМП (при рівній індукції). Сила гальмування  $F_r$  лінійно збільшується зі збільшенням швидкості руху диска (рис. 2, а). При збільшенні індукції ПДМП сили гальмування  $F_r$  збільшуються нелінійно, за квадратичною залежністю (рис. 2, б).

Досліджували гальмуючу дію ПДМП частотою 50 Гц на швидкість потоків у ванні фізичним моделюванням процесу. Схема пристрою, матеріали і методика експериментів були такими, які описані в роботі [9]. В головній частині модельної ванни на глибину 3...4 мм опускали штир 3 діаметром 7 мм з латуні (рис. 3). Торець цього штиря мав форму півсфери і був залужений припоєм ПОС-40. Після цього забезпечували протікання струму між штирем-електродом (рис. 3, 3), розплавленим припоєм – ванною (1) та пластиною-виробом (2) від зварювального випрямляча (включення відпові-

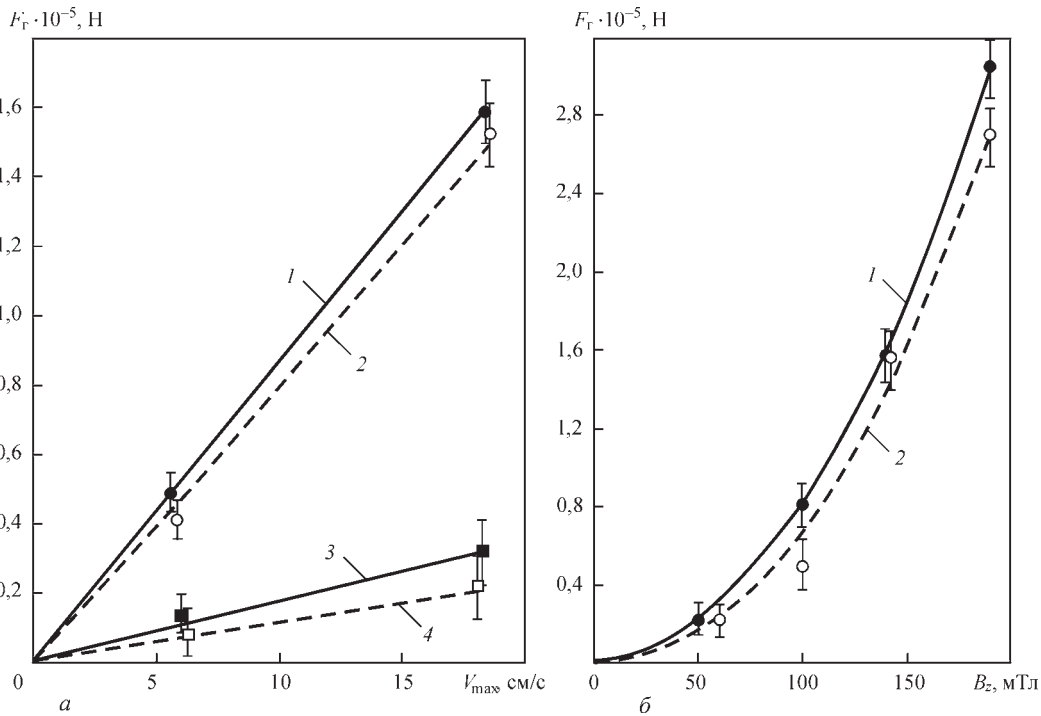


Рис. 2. Залежність сили гальмування  $F_T$  від максимальної швидкості переміщення диска (а) та від індукції  $B_z$  ПДМП (б): а – 1, 2 –  $B_z = 150$  мТл; 3, 4 –  $B_z = 63 \dots 66$  мТл; 1, 3 – постійне ПДМП; 2, 4 – змінне частотою 50 Гц ПДМП; б – 1 – постійне ПДМП; 2 – знакозмінне частотою 50 Гц ПДМП

дало зворотній полярності). Струмопідведення до пластини-виробу (2) здійснювали з боку головної частини модельної ванни («перед дугою»).

Пристрій введення ПДМП розміщували співісно з електродом (3). Струм у котушці пристрою введення ПДМП (на рис. 3 не приведений) пропускали від трансформатора типу ТД-402. Швидкість руху рідкого металу у модельній ванні (в розплавленому припої) вимірювали зануренням в неї

в якості зонда тонкої прямокутної металеві пластинки розмірами  $4 \times 4$  мм. При вимірюванні компоненти швидкості  $V_z$  зонд поміщали в т. А, а компоненти  $V_x$  – в точку В (рис. 3). Швидкість потоків обчислювали після вимірювання зусилля (напору) потоку рідкого металу на зонд за методикою, наведеною в роботі [9].

Експериментальні дані підтвердили положення про те, що змінне (у даному випадку частотою 50 Гц) ПДМП гальмує потоки рідкого металу ванни (рис. 4). При цьому компоненти швидкості потоку  $V_z$  і  $V_x$  практично лінійно зменшуються при збільшенні індукції  $B_z$  ПДМП.

**Обговорення.** Можна вважати, що при наплавленні дротом під флюсом дія ПДМП, як і при GMAW та TIG-зварюванні, призводить до змен-

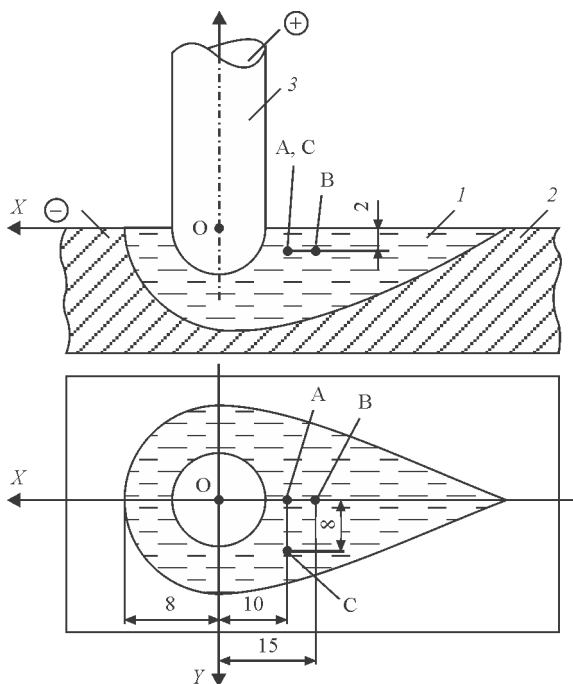


Рис. 3. Схема модельної ванни для вивчення в ній руху рідкого металу: 1 – розплавлений припій – ванна; 2 – пластинка-виріб; 3 – штир-електрод

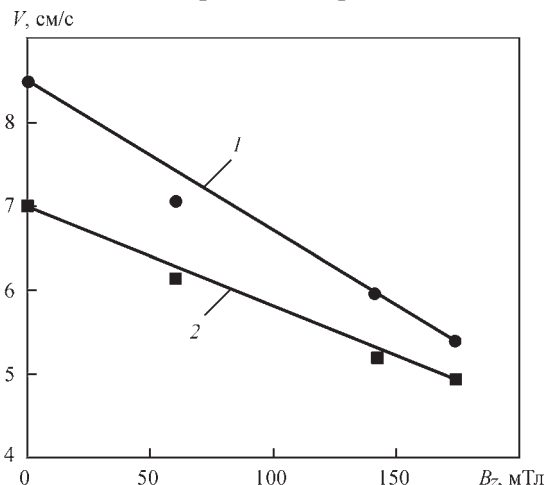


Рис. 4. Залежність швидкості потоку  $V_z$  (1) та  $V_x$  (2) від індукції ПДМП частотою 50 Гц ( $I = 500$  А)

шення тиску (зусилля) дуги на рідкий метал під зварювальною дугою, до зростання діаметра стовпа дуги [3–7]. На формування плоскої форми обрису зони проплавлення, яку спостерігали в роботі [9], впливають і особливості каплеперенесення при дуговому наплавленні з дією ПДМП.

При дії як постійного, так і знакозмінного частотою 50 Гц ПДМП краплі на торці електрода набувають імпульс сили та швидкості, спрямовані по дотичній до кола і вниз, тобто вони рухаються конусною поверхнею. Своім тепловмістом та імпульсом краплі сприяють зростанню проплавлення металу по краях валика. Однак основний внесок у загальне зниження глибини  $H_{пр}$  та площі проплавлення основного металу  $F_{пр}$  при дії ПДМП вносить гальмуюча дія ПДМП на швидкість потоку (в хвостову частину ванни з головної її частини).

Вважали, що гальмуюча дія ПДМП частотою 50 Гц на швидкість потоків рідкого металу з головної частини ванни в хвостову її частину найкраще проявиться, якщо здійснювати дугове наплавлення «на підйом». Для перевірки цього припущення були виконані наплавлення як на горизонтальні пластини, так і з нахилом їх до горизонту на кут  $8^\circ$ .

Встановлено, що при наплавленні без дії магнітного поля нахил пластини (наплавлення на «підйом») збільшив глибину проплавлення з 7,8 до 12,2 мм. При наплавленні з дією ПДМП частотою 50 Гц на горизонтальну пластину глибина проплавлення зменшилась до 3,5 мм. При наплавленні «на підйом» з дією ПДМП частотою 50 Гц глибина проплавлення зменшилась і склала 3,6 мм.

Таким чином ПДМП частотою 50 Гц надає гальмуючу дію на рух рідкого металу з головної частини ванни в хвостову її частину при наплавленні «на підйом». Зменшення ефективності проплавлення металу при дії ПДМП слід пояснювати, виходячи з факту гальмування швидкості потоку рідкого металу з головної частини ванни в хвостову її частину, збільшенням товщини прошарку рідкого металу під дугою та погіршенням умов передачі тепла від зварювальної дуги до основного металу.

При дії постійного ПДМП ситуація більш складна. В роботі [9] показано, що при струмі **Товщина прошарку рідкого металу під дугою при дуговому наплавленні ( $10^{-3}$  м)**

Нахил пластини	Характер наплавлення		
	Без дії ПДМП	З дією ПДМП	
			постійне поле
Горизонтальна пластинка	2,7	3,8	4,0
Нахил пластини під кутом $8^\circ$ до горизонту	2,5	3,8	4,1

$I = 500$  А в модельній ванні на відстані  $10 \cdot 10^{-3}$  м від вісі електрода (зварювальної дуги) в напрямку хвостової частини ванни швидкість потоку рідкого металу зростає при дії постійного ПДМП до значень індукції магнітного поля 50 мТл, і швидкість потоку не зростає, якщо індукція більша, ніж 50 мТл. Глибина проплавлення основного металу при дуговому наплавленні з дією постійного ПДМП також зростала, якщо індукція ПДМП була більша, ніж 50 мТл [1]. Слід вважати, що при індукції  $B_z \leq 50$  мТл ПДМП збільшується швидкість потоків рідкого металу в зварювальній ванні через дію сил Лоренца, а якщо індукція значно більша, ніж 50 мТл (наприклад: 50, 100, 150 мТл), то постійне ПДМП вже гальмує рух рідкого металу в зварювальній ванні і це призводить до зростання товщини прошарку рідкого металу під зварювальною дугою і до зменшення глибини проплавлення основного металу при дуговому наплавленні.

Досліджували вплив ПДМП на товщину прошарку рідкого металу під дугою при дуговому наплавленні. Матеріали при наплавленні і режими наплавлення були такими ж, які були при виконанні досліджень впливу ПДМП на глибину проплавлення металу. Дослідження виконували за методикою, наведеною в роботі [10]. При наплавленні індукція в зоні основного металу під зварювальним електродом (під дугою) складала 100 мТл. Дані (таблиця) підтверджують зроблене раніше припущення, що при дії як постійного, так і знакозмінного ПДМП частотою 50 Гц товщина прошарку рідкого металу під дугою збільшується (вона значно зростає, приблизно в 2 рази).

Отримані в цій роботі дані дозволяють дати таку рекомендацію: для того, щоб при дуговому наплавленні ділянок «на підйом» (наприклад, при переході з горизонтальних ділянок) зберегти незмінним значення глибини проплавлення основного металу необхідно (доцільно) використовувати (включати) ПДМП частотою 50 Гц з індукцією в межах 100...150 мТл.

**Заключення.** Розрахунки і фізичне моделювання дозволили встановити, що значення гальмуючої сили на електропровідні тіла зростають при зростанні їх швидкості переміщення в постійному і знакозмінному частотою 50 Гц поздовжньому магнітному полі, а також при зростанні індукції цих магнітних полів.

Фізичне моделювання дозволило встановити, що при протіканні струму 500 А в рідкому металі модельної ванни збільшення індукції ПДМП частотою 50 Гц від нульових значень до 175 мТл знижує компоненту швидкості руху рідкого металу в 1,5...2,0 рази, тобто чинить значну гальмуючу дію на швидкість руху рідкого металу в зварювальній ванні.



Встановлені експериментально дані про збільшення прошарку рідкого металу під зварювальною дугою при дуговому наплавленні з дією ПДМП підтверджують припущення, що зменшення глибини проплавлення металу при наплавленні з дією ПДМП обумовлено його гальмуючою дією на швидкість потоків в рідкому металі зварювальної ванни.

### Список літератури/References

1. Razmyshlyayev, A.D., Mironova, M.V. (2008) Peculiarities of base metal penetration in arc surfacing in longitudinal magnetic field. *The Paton Welding J.*, **8**, 18–22.
2. Болдырев А.М., Биржев В.А., Черных А.В. (1993) Управление глубиной проплавления при дуговой сварке и наплавке с помощью продольного переменного магнитного поля. *Сварочное производство*, **6**, 30–31.
3. Boldyrev, A.M., Birzhev, V.A., Chernykh, A.V. (1993) Control of penetration depth in arc welding and surfacing by longitudinal alternating magnetic field. *Svarochn. Proizvodstvo*, **6**, 30–31 [in Russian].
4. Chang, Y.-l., Bai, J., Liu, D., Mei, Q. (2016) Influence of longitudinal magnetic field on welding arc and formation of weld bead in CO<sub>2</sub> welding. *Journal of Shenyang University of Technology*, **38**, **6**, 612–617.
5. Wang, L., Wu, C., Chen, J., Gao, J. (2018) Influence of the external magnetic field on fluid flow, temperature profile and humping bead in high speed gas metal arc welding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **116**, 1282–1291.
6. 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.
7. 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.
8. Mou, G., Hua, X., Wang, M. et al. (2020) Effect of axial magnetic field on cold metal transfer arc-brazing of Ti6Al4V to 304L steel. *Journal of Materials Processing Technology*, **275**, 116322.
9. Яблонский А.А., Никифорова В.М. (2002) *Курс теоретической механики*. Санкт-Петербург, Лань.
10. Razmyshlyayev, A.D., Mironova, M.V., Deli, A.A. (2010) Speed of metal flows in the pool in arc surfacing in a longitudinal magnetic field. *Welding International*, **24**, **8**, 627–630.
11. Boldyrev, A.M., Birzhev, V.A., Chernykh, A.V. (1993) Calculation of hydrodynamic parameters of liquid metal at the bottom of the molten pool in arc welding. *Ibid*, **7**(6), 481–483.

## FORMATION OF THE PENETRATION ZONE OF THE BASE METAL IN ARC SURFACING WITH THE ACTION OF A LONGITUDINAL MAGNETIC FIELD

O.D. Razmyshlyayev<sup>1</sup>, M.V. Ahieieva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>State Higher Educational Establishment «Pre-Azov State Technical University» (PSTU), 7, Universitetskaya Str., 87500, Mariupol, Ukraine. E-mail: razmyshlyayev@gmail.com

<sup>2</sup>Donbass State Machine Building Academy, 72, Akademicheskaya Str., 84313, Kramatorsk, Ukraine. E-mail: maryna\_ah@ukr.net

In the work, the assumption was experimentally confirmed that the longitudinal magnetic field (LMP) in submerged arc surfacing can have a braking effect on the speed of movement of liquid metal in the welding pool. Using the calculation method and physical modelling, the values of the braking force depending on the speed of movement of electric conductive bodies under the action of LMP were established. The performed experiments in arc surfacing using the submerged wire showed that at the action of both constant as well as alternating LMP of 50 Hz frequency, the thickness of the interlayer of liquid metal in the pool under the arc increases by approximately 1.5...2.0 times. This allows concluding that the fact of decrease in the penetration depth of the base metal during surfacing with the action of LMP is predetermined by the braking effect of the magnetic field on the speed of liquid metal flows in the pool, followed by increase in the thickness of the interlayer of liquid metal under the arc and deterioration of the efficiency of the arc heat transfer to the base metal. 10 Ref., 1 Tabl., 4 Fig.

*Keywords: arc surfacing, longitudinal magnetic field, induction, flow braking, penetration depth*

Надійшла до редакції 08.11.2021

## УКАЗ ПРЕЗИДЕНТА УКРАЇНИ №660/2021

(ВИТЯГ)

Про присудження Національної премії України імені Бориса Патона 2021 року.

На підставі подання Комітету з Державних премій України в галузі науки і техніки постановляю:

Присудити Національну премію України імені Бориса Патона 2021 року:

за роботу «Фізичні основи та інноваційні технології ультразвукового оброблення матеріалів»:

КЛОЧКОВУ Іллі Миколайовичу – кандидатові технічних наук, ученому секретареві Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України;

СОЛОВ'Ю Сергію Олександровичу – кандидатові технічних наук, провідному науковому

співробітникові Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України.

Президент України В. ЗЕЛЕНСЬКИЙ

16 грудня 2021 року