

УДК 621.791.053

**О ФОРМИРОВАНИИ ШВОВ ПРИ СВАРКЕ НА ВЕСУ  
В ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

**©Ситников Б. В., Маршуба В. П.**

**Інформація про авторів:**

**Ситников Борис Валентинович.** ORCID: 0000-0003-2581-1486; sitnikovboris@outlook.com; кандидат технічних наук; доцент кафедри зварювання; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

**Маршуба Вячеслав Павлович:** ORCID: 0000-0003-1426-6240; marshuba\_vp@outlook.com; кандидат технічних наук; доцент кафедри зварювання; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

Целью данной работы является повышение производительности, и качество формирования швов при импульсно-дуговой сварке неплавящегося вольфрамовым электродом на весу в аргоне хромоникелевой аустенитной стали 12X18H10T путем воздействия на дугу и металл сварочной ванны внешним продольным магнитным полем, которое генерируется соленоидом, расположенным на сопле сварочной горелки.

Параметры режима сварки определялись экспериментальным путем. При планировании эксперимента параметры режима сварки варьировались по очереди в каждой отдельной серии опытов. Математическая модель, построенная на основании опытных данных, позволяет усовершенствовать процесс импульсно-дуговой сварки с полным проплавлением кромок в продольном магнитном поле.

Полученные экспериментальные данные с теоретическим обоснованием могут быть использованы для повышения качества сварочных работ. Разработана методика определения экспериментальных зависимостей.

**Ключевые слова:** импульсно-дуговая сварка; вольфрамовый электрод; аргон; сварочная ванна; корень шва; соленоид; продольное магнитное поле.

**Ситников Б. В., Маршуба В. П.** «Про формування швів при зварюванні у висячому положенні в поздовжньому магнітному полі».

Метою даної роботи є підвищення продуктивності, і якість формування швів при імпульсно-дугового зварювання плавиться вольфрамовим електродом у висячому положенні в аргоні хромоникельової аустенітної сталі 12X18H10T шляхом впливу на дугу і метал зварювальної ванни зовнішнім поздовжнім магнітним полем, яке генерується соленоїдом, розташованим на соплі зварювального пальника.

Параметри режиму зварювання визначалися експериментальним шляхом. При плануванні експерименту параметри режиму зварювання варіювалися по черзі в кожній окремій серії дослідів. Математична модель, побудована на основі дослідних даних, дозволяє вдосконалити процес імпульсно-дугового зварювання з повним проплавленням кромок в поздовжньому магнітному полі.

Отримані експериментальні дані з теоретичним обґрунтуванням можуть бути використані для підвищення якості зварювальних робіт. Розроблено методику визначення експериментальних залежностей.

**Ключові слова:** імпульсно-дугове зварювання, вольфрамовий електрод, аргон, зварювальний ванна, корінь шва, соленоїд, поздовжнє магнітне поле.

*Sitnikov B., Marshuba V.* “On the formation of weld seams in a longitudinal magnetic field”.

The purpose of this work is to increase the productivity and quality of joint formation during pulsed arc welding of tungsten-free non-melting electrode in argon of 12X18H10T chromium-nickel austenitic steel by applying an external longitudinal magnetic field to the arc and metal of the weld pool, which is generated by a solenoid located on the nozzle of the welding torch.

The parameters of the welding regime were determined experimentally. When planning the experiment, the parameters of the welding regime varied in turn in each separate series of experiments. The mathematical model, built on the basis of experimental data, makes it possible to improve the process of pulse-arc welding with full penetration of the edges in a longitudinal magnetic field.

The obtained experimental data with theoretical justification can be used to improve the quality of welding operations. A technique for determining the experimental dependences is developed.

**Key words:** pulse-arc welding; tungsten electrode; argon; welding bath; root of the seam; solenoid; longitudinal magnetic field.

### **1. Постановка проблемы в общем виде**

В общем объеме работ по производству сварных металлоконструкций сварка на весу занимает значительную часть и ответственное место (корневой шов трубопроводов, завершающий шов закрытых полостей и т. п.). В ряде случаев применение сварки на весу существенно упрощает процесс. Однако, при этом, возрастает опасность протекания жидкого металла, образования прожогов и чрезмерного повисания металла в корне шва. Поэтому разработка способов, позволяющих повысить качество формирования шва при сварке на весу, остаётся одной из актуальных проблем.

### **2. Анализ исследований и публикаций по теме статьи**

Для получения стыковых швов без прожогов с допустимой высотой провисания металла в корне шва, увеличения толщины свариваемых листов за один проход и повышения производительности процесса сварки используют различные способы, удерживающие жидкий металл сварочной ванны.

Сварка на подкладках обеспечивает значительное увеличение толщины изделий, свариваемых за один проход. Но использование подкладок ограничивается необходимостью доступа к обратной поверхности шва и невозможностью регулирования высоты провисания шва в процессе сварки [1].

Применение импульсных методов сварки позволяет получить форму проплава близкую к сферической. Силы поверхностного натяжения, в этом случае, достигают своего максимума, при всех прочих равных условиях, провисание жидкого металла должно быть значительно меньше, чем при сварке дугой постоянного действия [2].

Формирование шва за счет создания перепада давлений на наружной и внутренней сторонах сварочной ванны позволяет получать любую высоту провисания шва, в том числе и при сварке изделий, не имеющих доступа к обратной стороне шва. Однако высокие требования к качеству сборки стыка, необходимость плотного прилегания камеры к поверхности стыка, налагают ограничения на применение этого способа [1].

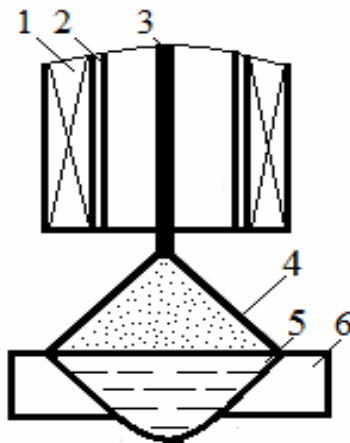
**Технологія машинобудування**

Для удержания сварочной ванны и получения швов заданной геометрической формы, без резкого перехода от основного металла ко шву, увеличения толщины свариваемых деталей за один проход и повышения производительности дуговых способов сварки, представляет значительный интерес использование внешних магнитных полей. Из-за отсутствия непосредственного контакта устройств для магнитного удержания жидкого металла со свариваемыми заготовками, этот метод нечувствителен к наличию превышения кромок, кривизне заготовок и другим факторам, затрудняющим применение прокладок, камер и т.п. [3-5].

Применение магнитных полей для удержания сварочной ванны в ряде случаев осложняется побочными эффектами, связанными с неравномерным растеканием тока по ванне и возмущающим действием поля на дугу. Это приводит к ухудшению формирования шва, снижению проплавляющей способности дуги и вынуждает применять более сложные устройства, что затрудняет маневренность сварочного инструмента и ограничивает возможность метода в целом [3]. Однако, несмотря на определенные трудности при разработке достаточно компактных устройств, для получения внешних поперечных магнитных полей, их использование позволяет существенно изменять условия формирования швов, предупреждать провисание жидкой части ванны и повышать производительность сварки.

**3. Изложение основного материала**

Исследование процесса формирования сварных швов при импульсно-дуговой сварке в продольном магнитном поле (ПМП) проводились при автоматической сварке стыковых швов с полным проплавлением кромок образцов из стали 12X18H10T толщиной 2...4 мм (рис. 1). Сварку выполняли в нижнем положении вольфрамовым электродом марки ЭВЛ (ГОСТ 23949-80)



**Рис. 1** – Схема проведения экспериментов: 1 – соленоид; 2 – сопло сварочной горелки; 3 – вольфрамовый электрод; 4 – сварочная дуга; 5 – сварочная ванна; 6 – изделие

диаметром 4 мм в аргоне высшего сорта (ГОСТ 10157-79) на автомате АДСВ-2М. Установка позволяла визуально наблюдать процессы в дуге и сварочной ванне, проектировать их с увеличением на экран, а также кинографировать в отражённом свете [6]. Измерения высоты  $h$  провисания металла в корне шва проводили с помощью инструментального микроскопа при 12-кратном увеличении с точностью до 0,1мм. Величину сварочного тока устанавливали из условия одинаковой ширины проплавления с обратной стороны шва.

Результаты проведенных экспериментов представлены на рис. 2. Как следует из приведенных зависимостей, с увеличением индукции ПМП высота провисания металла в корне шва монотонно уменьшается. Так, при увеличении индукции ПМП от 0 до  $2,510^{-2}$  Т, провисание металла в корне шва, в зависимости от скорости сварки, уменьшается следующим образом: при  $V_{CB} = 24$  м/ч с 1,5 до 0,5 мм, при  $V_{CB} = 18$  м/ч с 1,3 до 0,4 мм, при  $V_{CB} = 12$  м/ч с 1,1 до 0,1 мм (рис. 3). Повышение же скорости сварки, наоборот, способствует увеличению высоты провисания

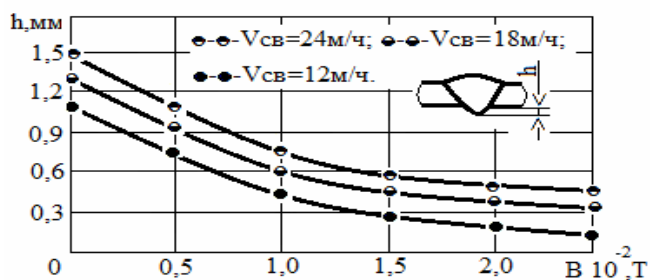


Рис. 2 – Влияние параметров режима сварки на высоту провисания металла в корне шва

0,6 мм, при  $B = 2 \cdot 10^{-2}$  Т, от 0,2 до 0,5 мм, при  $B = 2,5 \cdot 10^{-2}$  Т, от 0,1 до 0,4 мм.

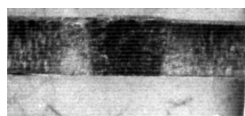
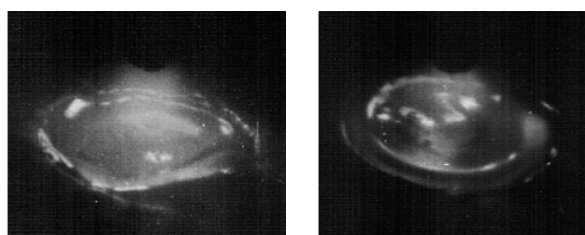


Рис. 3 – Макроструктура сварного шва

Увеличение высоты провисания металла в корне шва с повышением скорости сварки обычно связывают [1] с увеличением силы давления дуги, веса жидкого металла и снижением сил поверхностного натяжения. При сварке в ПМП давление дуги на жидкий металл сварочной ванны снижается [7]. В последнем дуга и металл сварочной ванны приобретают вращательное движение (рис. 4). Чем больше индукция магнитного поля, тем больше скорость вращения плазменного потока, меньше его аксиальная составляющая и силовое воздействие на ванну.



а)

б)

Рис. 4 – Фрагменты скоростной киносъемки дугового промежутка:

а)  $B = 0$  Т; б)  $B = 2,5 \cdot 10^{-2}$  Т

При этом скорость вращательного движения плазмы дуги по поверхности сварочной ванны на три порядка выше скорости перемещения ее расплава регистрируемой с обратной стороны шва [8, 9].

На поверхности сварочной ванны со стороны дуги должны выполняться очевидные граничные условия:

$$V_r = 0; V_\varphi = \omega r; V_z = 0, \quad (1)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения плазменных потоков в дуге;

$V_r, V_\varphi$  и  $V_z$  – радиальная, тангенциальная и аксиальная компоненты скорости.

Условие для тангенциальной составляющей скорости  $V_\varphi$  показывает, что на поверхности раздела фаз жидкий металл сварочной ванны вращается вместе с плазменным потоком. Вращение плазменных потоков дуги, увлекающих расплав сварочной ванны, приводит к появлению вблизи поверхности раздела фаз радиальной скорости, направленной от центра ванны к ее периферийным областям. Для того, чтобы обеспечить подачу расплава к поверхности раздела фаз, вдали от наружной поверхности ванны должен существовать постоянный вертикальный поток жидкого металла. Поэтому граничные условия на дне сварочной ванны могут быть записаны следующим образом:

$$V_r = 0; V_\varphi = 0; V_z = -V_0, \quad (2)$$

где  $V_0$  – должно найдено из самого решения задачи.

Наличие аксиальной симметрии, что соответствует случаю импульсно-дуговой сварки, приводит к исчезновению всех производных по углу  $\varphi$ . Давление в расплаве вдоль радиуса  $r$  можно считать постоянным.

## Технологія машинобудування

Тогда уравнения Навье-Стокса (1) – (3) можно переписать в виде [9]:

$$V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_\varphi^2}{r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} = \nu \left( \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_r}{r^2} \right), \quad (3)$$

$$V_r \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} + \frac{V_r V_\varphi}{r} + V_z \frac{\partial V_\varphi}{\partial z} = \nu \left( \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} - \frac{V_\varphi}{r^2} \right), \quad (4)$$

$$V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} \right). \quad (5)$$

Решение уравнений (3) – (5), удовлетворяющее уравнению непрерывности и граничным условиям (1), (2) обычно ищут в виде  $V_r = r\omega F(\xi)$ ,  $V_\varphi = r\omega G(\xi)$ ,  $V_z = \sqrt{\nu\omega} H(\xi)$ ,  $P = -\rho\nu\omega P(\xi)$ , где переменная представляет безразмерное отношение:

$$\xi = \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} Z, \quad (6)$$

где  $F, G, H$  и  $P$  неизвестные функции, которые удовлетворяют уравнениям:

$$F^2 - G^2 + F^1 H = F^{11}, \quad (7)$$

$$2FG + G^1 H = G^1, \quad (8)$$

$$H H^1 = P^1 + H^1, \quad (9)$$

$$2F + H^1 = 0 \quad (10)$$

и граничным условием:

$$F = 0, G = 1, H = 0, \text{ при } \xi = 0, \quad (15)$$

$$F \rightarrow 0, G \rightarrow 0, H \rightarrow -\alpha, \text{ при } \xi \rightarrow \infty \quad (16)$$

получающимися при подстановке определений  $V_r$ ,  $V_\varphi$  и  $V_z$  в уравнение Навье-Стокса и уравнение непрерывности, а также в граничные условия. Постоянная  $\alpha = \frac{V_0}{\sqrt{\nu\omega}}$ , подлежит определению.

Из графиков функций  $F, G$  и  $H$ , (рис. 5) вытекает следующая картина распределения

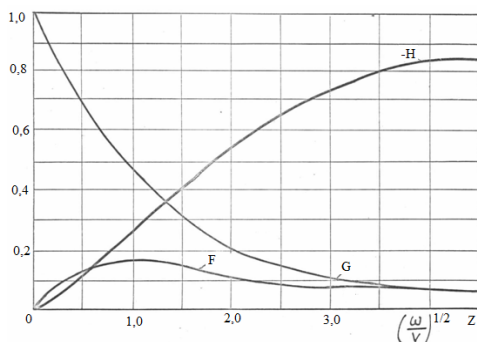


Рис. 5 – График функций  $F, G$  и  $H$

скоростей: при  $\xi = 3,6$ , что соответствует значению  $z = \delta_0$ , где  $\delta_0 = 3,6 \sqrt{\frac{\nu}{\omega}}$ , скорость  $V_z$  достигает

значения, равного 0,8 предельного значения. Скорость  $V_\varphi$  снижается до 0,05 от своего значения на поверхность раздела фаз. Можно поэтому условно считать  $\delta_0$  толщиной гидродинамического пограничного слоя на наружной поверхности ванны. В пределах пограничного слоя отличны от нуля  $V_r$  и  $V_\varphi$ ,

вне этого слоя меняется только аксиальное движение.

С переходом ванны в положение на весу перемещение жидкого металла к разделу фаз происходит вместе с поверхностью проплава. Кривизна последней уменьшается. Высота провисания металла в корне шва, при всех прочих равных условиях, будет определяться индукцией продольного магнитного поля.

**Выводы**

1. При импульсно-дуговой сварке вольфрамовым электродом в аргоне стали 12X18H10T с увеличением индукции продольного магнитного поля от 0 до  $2,5 \cdot 10^{-2}$  Т провисание металла в корне шва монотонно уменьшается.

2. Применение продольного магнитного поля при импульсно-дуговой сварке позволяет повысить производительность и качество формирования шва при сварке на весу.

**Список использованной литературы**

1. Акулов А. И. Удержание жидкого металла сварочной ванны поперечным магнитным полем / А. И. Акулов, А. М. Рыбачук // *Сварочное производство*. – 1972. – № 2. – С. 3-4.
2. Ищенко Ю. С. Методика оценки статического равновесия жидкой ванны при Y-образной разделке кромок / Ю. С. Ищенко, В. А. Букаров // *Сварочное производство*. – 1978. – № 10. – С. 9-13.
3. Сварка с электромагнитным перемешиванием / В. П. Черныш, В. Д. Кузнецов, А. Н. Брискман, Г. М. Шеленков. – Киев : Техніка, 1983. – 127 с.
4. Зворонко Я. П. Дуговая сварка с электромагнитным удержанием сварочной ванны / Я. П. Зворонко, С. М. Катлер // *Сварочное производство*. – 1982. – № 5. – С. 3-4.
5. Математическая модель аргонодуговой сварки в квадрупольном магнитном поле / Г. Г. Чернышов, В. В. Григоренко, О. Н. Киселёв, В. А. Судник // *Сварочное производство*. – 1989. – № 8. – С. 31-33.
6. Ильенко Н. А. Исследование процессов сварки при помощи фотокинографирования в отражённом потоке света / Н. А. Ильенко, В. Ф. Сидоренко, Б. Ф. Кусков // *Сварочное производство*. – 1978. – № 6. – С. 50-51.
7. Ситников Б. В. Силовое воздействие импульсной дуги на свариваемый металл / Б. В. Ситников // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2004. – № 4 (10). – С. 114-116.
8. Черныш В. П. Особенности движения жидкого металла сварочной ванны при электромагнитном перемешивании / В. П. Черныш, В. Ю. Поповский // *Автоматическая сварка*. – 1980. – № 4. – С. 4-6.
9. Емцев Б. Т. Техническая гидродинамика / Б. Т. Емцев. – М. : Машиностроение, 1978. – 462 с.

**References**

1. Akulov, A & Rybachuk, A 1972, 'Uderzhaniye zhidkogo metalla svarochnoy vannы poperechnym magnitnym polem', *Svarochnoye proizvodstvo*, no. 2, pp. 3-4.
2. Ishchenko, Yu & Bukarov, V 1978, 'Metodika otsenki staticheskogo ravnovesiya zhidkoy vannы pri Y-obraznoy razdelke kromok', *Svarochnoye proizvodstvo*, no. 10, pp. 9-13.
3. Chernysh, V, Kuznetsov, V, Briskman, A & Shelenkov, G 1983, *Svarka s elektromagnitnym peremeshivaniem*, Tekhnika, Kyiv.
4. Zvoronko, Ya & Katler, S 1982, 'Dugovaya svarka s elektromagnitnym uderzhaniyem svarochnoy vannы', *Svarochnoye proizvodstvo*, no. 5, pp. 3-4.
5. Chernyshov, G, Grigorenko, V, Kiselev, O & Sudnik V 1989, 'Matematicheskaya model argonodugovoy svarki v kvadropolnom magnitnom pole', *Svarochnoye proizvodstvo*, no. 8, pp. 31-33.
6. Ilyenko, N, Sidorenko, V & Kuskov, B 1978, 'Issledovaniye protsessov svarki pri pomoshchi fotokinografirovaniya v otrazhennom potoke sveta', *Svarochnoye proizvodstvo*, no. 6, pp. 50-51.
7. Sitnikov, B 2004, 'Silovoye vozdeystviye impulsnoy dugi na svarivayemyy metall', *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*, no. 4 (10), pp. 114-116.
8. Chernysh, V & Popovskiy, V 1980, 'Osobennosti dvizheniya zhidkogo metalla svarochnoy vannы pri elektromagnitnom peremeshivanii', *Avtomaticheskaya svarka*, no. 4, pp. 4-6.
9. Yemtsev, B 1978, *Tekhnicheskaya gidrodinamika*, Mashinostroyeniye, Moskva.

Стаття надійшла до редакції 24 листопада 2017 р.