

УДК 621.791.927.5

**Богущий А. А., Макаренко Н. А., Грановская Н. А.**

### **ВЛИЯНИЕ РАЗНОПОЛЯРНО-ИМПУЛЬСНОГО РЕЖИМА ГОРЕНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ ДУГИ НА ЖИДКУЮ МЕТАЛЛИЧЕСКУЮ ВАННУ**

Применение импульсных режимов горения плазменной дуги при плазменной сварке и наплавке нашло достаточно широкое применение. Так, начиная с конца 60-х годов прошлого века, серийно выпускались установки ВСВУ-315, которые обеспечивали ведение плазменно-дуговых процессов как при непрерывном, так и при импульсном режимах горения плазменной дуги. Они позволяли регулировать основные параметры импульсного режима в широких пределах: токи импульса и паузы; длительности импульса и паузы, а также скорости нарастания и спада тока в начале и в конце импульса (позже были выпущены установки УПС-301 аналогичного назначения).

Установка ИСВУ-315, предназначена для сварки сплавов на основе алюминия и магния, реализующая принцип сварки на переменном токе промышленной частоты (50 Гц). Данная установка, благодаря своей схеме построения, обеспечивает сварку металлов на переменном токе с искаженной формой синусоиды, приближающейся к прямоугольной, и ускоренным переходом тока (при переходе полярности через ноль). Аналогичная ей установка ТИР-300М также получила распространение на предприятиях оборонного комплекса СССР. По принципам построения эти плазменные установки наиболее близко подходят к установкам для разнополярно-импульсной плазменной наплавки.

Разнополярно-импульсный режим сварки легких сплавов осуществлялся с применением двух коммутируемых источников постоянного тока [1]. В тоже время, исследования разнополярно-импульсного режима горения плазменной дуги практически не проводились. Например, не исследовано: влияние давления плазменной дуги, питаемой разнополярно-импульсным током, на процессы, происходящие в жидкой металлической ванне; влияние разнополярно-импульсного режима на качество наплавленного металла. В связи с этим, задача установления влияния разнополярно-импульсного режима на процессы формирования металла, его рабочие характеристики при плазменной наплавке является актуальной.

Давление плазменной дуги на жидкую металлическую ванну является важным фактором при формировании наплавленного валика. От величины давления дуги во многом зависит глубина проплавления основного металла, следовательно, и доля участия основного металла в наплавленном валике. Таким образом, величина давления плазменной дуги на жидкую металлическую ванну во многом определяет структуру и химический состав наплавленного металла и его служебные характеристики.

Изучению давления дуги на жидкую металлическую ванну посвящены многочисленные работы [2–5]. В частности, в работе [4] исследовано влияние униполярно-импульсного режима горения дуги и ее силовое воздействие на сварочную ванну. Полученные в работе [4] данные согласуются с полученными позднее в работе [6].

Силовое воздействие плазменной дуги на жидкую металлическую ванну анализировалось в работе [7], а при применении гибридных процессов – в работе [8]. В тоже время, силовое воздействие плазменной дуги разнополярно-импульсного тока на ванну жидкого металла не изучено.

Цель работы: исследование основных параметров наплавки при плазменном процессе на разнополярно-импульсном режиме горения дуги на формирование металлической ванны.

Для определения силового воздействия плазменной дуги на жидкую металлическую ванну была создана установка (рис. 1).

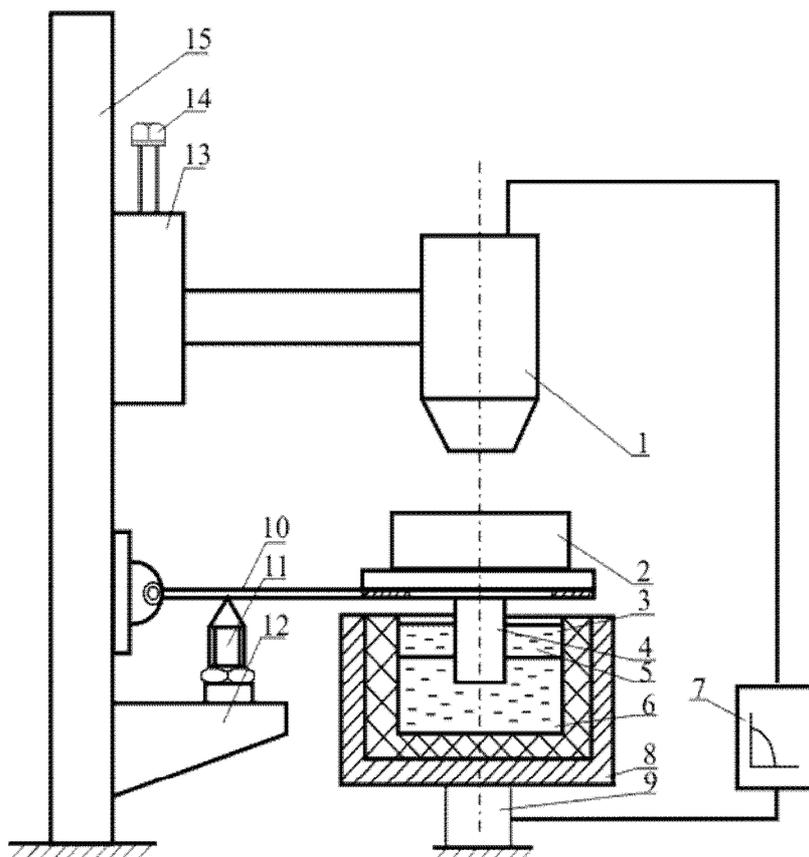


Рис. 1. Схема установки для определения силового воздействия плазменной дуги на обрабатываемое изделие:

1 – плазматрон; 2 – медный образец; 3 – графитовая чашка; 4 – графитовый стержень; 5 – вода; 6 – ртуть; 7 – источник питания; 8 – медная обойма; 9 – токоподвод; 10 – рычаг; 11 – регулировочный винт; 12 – датчик давления; 13 – механизм вертикального перемещения плазматрона; 14 – винт; 15 – деревянная стойка

С целью избежания погрешностей, вызываемых магнитными полями сварочного тока, все части установки были выполнены из немагнитных материалов (латунь, бронза, дерево, графит), а стойка 9 – из алюминиевой трубы. Источник питания размещен на расстоянии 3 м от установки, а горизонтальные части токопроводящих кабелей расположены: нижний – на удалении 1,5 м; а верхний – на 2 м выше установки (таким образом, установка реализовывает принцип взвешивания при увеличенном электрическом контуре [2]). В качестве датчика давления использовался пьезоэлектрический датчик, что позволяет снизить инерционность системы за счет уменьшения величины перемещения подвижной части (по сравнению с механическими и электромагнитными системами измерения давления).

Суммарное давление плазменной дуги на жидкую металлическую ванну складывается из нескольких факторов, основные из которых: давление потока плазмообразующего газа; упругие удары заряженных частиц о поверхность изделия; реактивное действие струи паров металла, испаряющихся с поверхности сварочной ванны; электромагнитные силы.

Общее воздействие этих факторов, обуславливающих силовое воздействие дуги, подчиняется уравнению Ф. Крида (1932 г.):

$$P = K \cdot I^2, \quad (1)$$

где  $P$  – сила давления дуги на жидкую металлическую ванну, Н;  $I$  – ток дуги, А;  $K$  – коэффициент пропорциональности.

При этом  $K$  зависит от ряда факторов: атмосферы горения дуги, ее длины, плотности тока в столбе дуги и др.

Определить воздействие каждого из факторов, вызывающего силовое воздействие дуги на жидкую металлическую ванну, представляет сложную задачу (для этих целей целесообразно применять данные, полученные экспериментальным путем).

До настоящего времени в научных изданиях отсутствуют данные исследования силового воздействия дуги на жидкую металлическую ванну.

В связи с чем была проведена серия экспериментов. Учитывая особенности плазменно-порошковой наплавки шнеков экструдеров, исследования проводились в диапазоне токов плазменной дуги 40–160 А (при диаметре вольфрамового электрода марки ЭВИ-1 – 4 мм). Расход плазмообразующего газа – аргона – 1,3 л/мин. Применялся плазмотрон, имеющий диаметр плазмообразующего сопла – 5,2 мм; длину плазмообразующего канала – 4,5 мм при величине углубления электрода в сопло 2,0 мм,

Исследования показали, что воздействие дуги на ванну жидкого металла с увеличением силы тока резко увеличивается (рис. 2). Установлено, что силовое воздействие дуги на жидкую металлическую ванну при обратной полярности будет несколько ниже, чем при прямой.

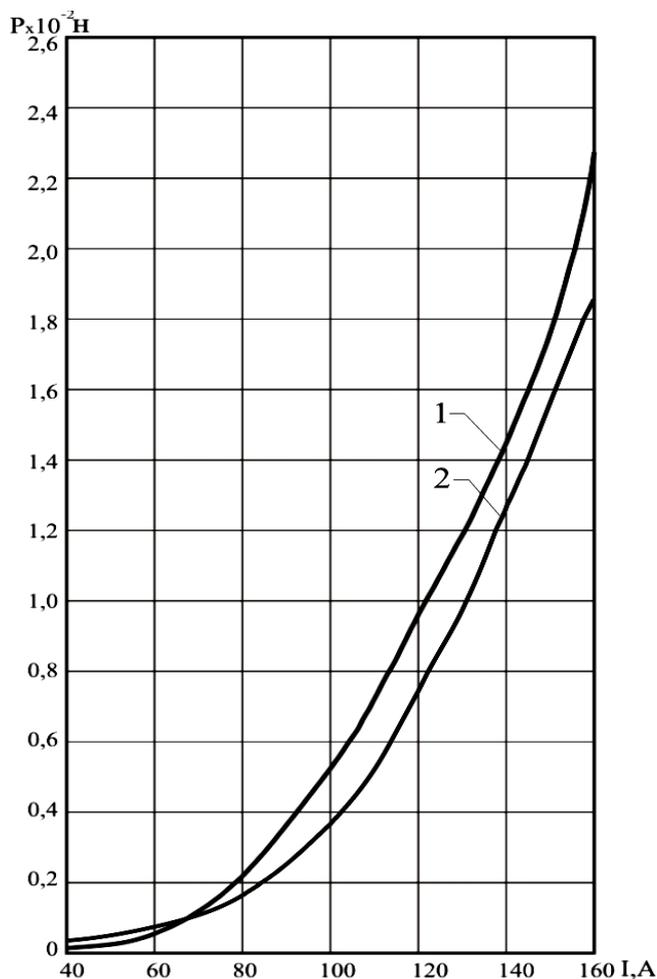


Рис. 2. Зависимость силы давления плазменной дуги на жидкую металлическую ванну от величины тока наплавки:

1 – прямая полярность; 2 – обратная полярность

Расчеты коэффициента  $K$  для разных токов дуги (согласно формуле Ф. Крида) показывают, что его величина не остается постоянной, а возрастает с увеличением силы тока

(особенно резко – в диапазоне токов 80–100 А), что объясняется следующим: при малых значениях тока плазменной дуги и диаметре плазмобразующего сопла 5,2 мм степень обжатия дуги незначительна, а с ростом тока дуги степень обжатия дуги увеличивается и приводит к росту величины коэффициента  $K$ .

Исследования показали, что с увеличением силы сварочного тока значения коэффициента  $K$  возрастают как на прямой, так и на обратной полярности (оставаясь при этом выше на прямой полярности) (рис. 3).

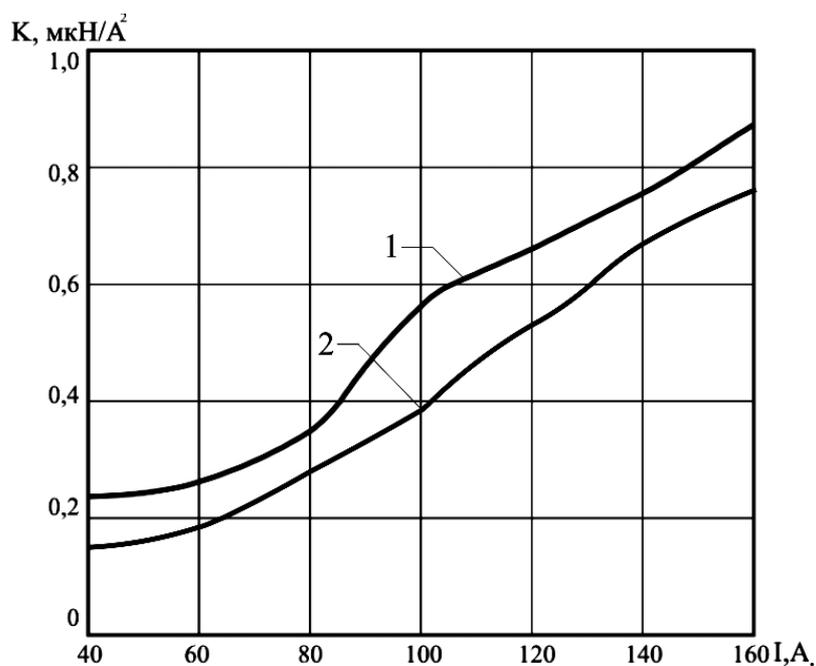


Рис. 3. Зависимость коэффициента  $K$  от тока плазменной дуги:  
1 – прямая полярность; 2 – обратная полярность

При обратной полярности тока плазменной дуги стойкость вольфрамового электрода в несколько раз ниже [9], чем при прямой, в связи с чем необходимо обеспечить ограничение тока обратной полярности до величины меньшей предельно допустимой, т. е. не более 80 А [9, 10].

Установлено, что при реальных режимах наплавки необходимо величину тока обратной полярности устанавливать значительно ниже величины тока прямой полярности, что обеспечивает длительный срок службы вольфрамового электрода плазмотрона.

Для обеспечения необходимого тепловложения в наплавляемое изделие (с учетом того фактора, что при одинаковых величинах токов прямой и обратной полярности нагрев изделия при прямой полярности значительно выше, чем при обратной) необходимо увеличивать непосредственно ток прямой полярности [9].

Исследования величины тепловложения в изделие осуществляли калориметрическим методом с помощью установки, представленной на рис. 4.

Образец  $O$  представлял собой медный брусок сечением  $20 \times 20$  мм и длиной 60 мм, имеющий по длине сквозное отверстие диаметром 8 мм. По краям отверстия к бруску были припаяны припоем ПМФС две медные трубки диаметром 8 мм, через которые подавалась охлаждающая образец вода. Расход воды устанавливался с помощью крана  $K$  и контролировался ротаметром  $P$ , а также с помощью мерного цилиндра и секундомера. Ртутный термометр  $T1$  измерял температуру воды на входе в брусок, а термометр  $T2$  – температуру на выходе.

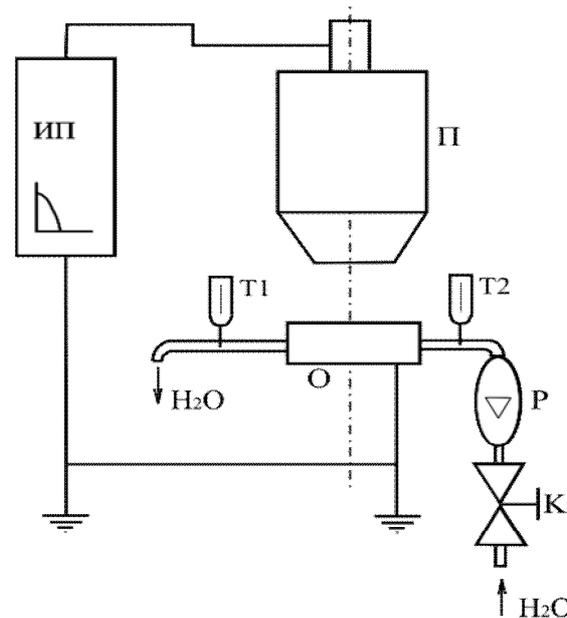


Рис. 4. Схема установки для определения тепловложения в изделие при плазменной наплавке:

П – плазмоторн; О – медный водоохлаждаемый образец; ИП – источник питания; К – кран; Р – ротаметр; Т1 и Т2 – ртутные термометры

Тепловложение в брусок определялось по разности показаний термометров и расходу охлаждающей воды.

Учитывая довольно большую инерционность, связанную со значительной массой медного образца, измерения производились в установившемся режиме: через 1,5 минуты после установления режима горения дуги.

Получены зависимости изменения тепловложения в образец от величины тока плазменной дуги при прямой и обратной полярности плазменной дуги (рис. 5), которые показывают, что при одинаковых величинах тока тепловложение в изделие на обратной полярности оказывается ниже на 12–18 %, чем при применении тока прямой полярности.

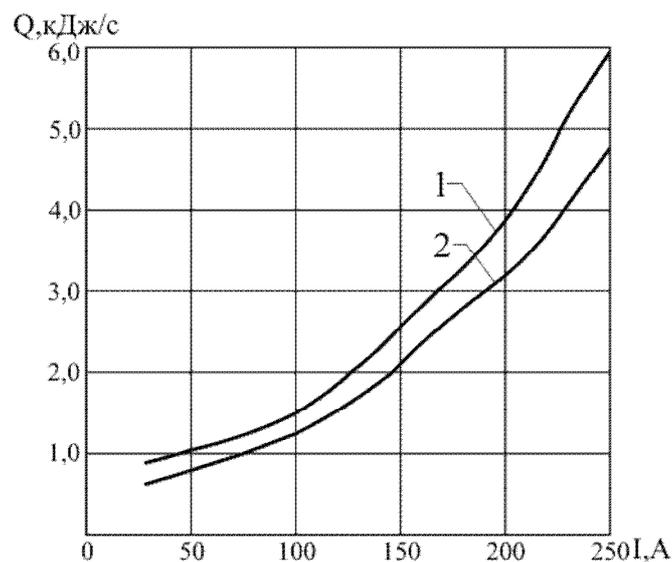


Рис. 5. Зависимость теплового потока в изделии от тока плазменной дуги:  
1 – прямая полярность; 2 – обратная полярность

Следовательно, при плазменной наплавке с применением разнополярно-импульсного тока периодически происходят пульсации температуры жидкой металлической ванны, сопровождаемые изменением сил, действующих на нее. При этом в периоды импульсов тока обратной полярности происходит кристаллизация металла, а в периоды импульсов тока прямой полярности – кристаллизация останавливается, а за счет увеличения давления со стороны дуги на ванну происходит дробление части кристаллов. Подобное явление наблюдается при наложении ультразвуковых колебаний или вибраций как при сварке, так и при отливке слитков в металлургии.

Установлено, что при импульсах тока обратной полярности величина силы тока плазменной дуги может быть значительно ниже величины силы тока дуги прямой полярности (в 2–3 раза), что позволяет обеспечить повышенную стойкость вольфрамового электрода, а также снизить тепловложение в основной металл. В полупериоды обратной полярности происходит очистка поверхности основного металла от оксидов за счет эффекта катодного распыления, что резко приводит к улучшению смачиваемости основного металла присадочным (последнее имеет особенное значение, учитывая малую глубину проплавления основного металла (доля основного металла в наплавленном валике составляет 1–8 %)).

Рекомендуем следующий режим плазменной наплавки:  $U_d = 25$  В;  $I_{\text{ПРЯМ. ПОЛ}} = 180$  А;  $I_{\text{ОБР. ПОЛ}} = 30–60$  А;  $T_{\text{ПРЯМ. ПОЛ}} = 0,01–0,02$  с;  $T_{\text{ОБР. ПОЛ}} = 0,005–0,015$  с;  $Q_{\text{ПЛ. ГАЗА}} = 1,2–1,8$  л/мин;  $V_{\text{НАПЛ}} = 6–8$  м/ч;  $Q_{\text{ПОРОШКА}} = 1,2–5$  кг/ч (в зависимости от требуемой толщины слоя).

## ВЫВОДЫ

1. Исследования показали, что величина силового воздействия плазменной дуги на жидкую металлическую ванну выше при прямой полярности, чем при обратной.

2. Установлено, что при плазменной наплавке коэффициент пропорциональности зависимости силового воздействия дуги на жидкую металлическую ванну от квадрата силы тока не является величиной постоянной, а увеличивается с ростом тока как при прямой, так и при обратной полярности тока дуги. При этом его значение на прямой полярности больше, чем при обратной.

3. Установлено, что тепловложение в изделие на обратной полярности ниже на 12–18 %, чем на прямой.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Малаховский В. А. Плазменная сварка / В. А. Малаховский. – М. : Высш. школа, 1987. – 80 с.
2. Ленивкин В. А. Технологические свойства дуги в защитных газах / В. А. Ленивкин, Н. Г. Дюргерев, Х. Н. Сагиров. – М. : Машиностроение, 1989. – 264 с.
3. Макаренко Н. А. Методика исследования силового воздействия плазменно-газового потока / Н. А. Макаренко // Современные проблемы сварки и ресурса металлоконструкций : тр. Междунар. конф. – К., 2003. – С. 42.
4. Ерохин А. А. Силовое воздействие импульсной дуги на свариваемый металл / А. А. Ерохин // Автоматическая сварка. – 1976. – № 5. – С. 6–7.
5. А. с. 1655730 СССР НКИ В23 К3 1/12. Способ изменения силового воздействия сварочной дуги на сварочную ванну / А. Н. Корниенко, Я. А. Романенко. – № 4633870/27 ; заявл. 09.01.89 ; опубл. 15.06.91, Бюл. 22. – 4 с.
6. Вагнер Ф. А. Оборудование и способы сварки пульсирующей дугой / Ф. А. Вагнер. – М. : Энергия, 1980. – 116 с.
7. Макаренко Н. А. Развитие научных и технологических основ плазменной сварки и наплавки плавящимся и неплавящимся электродами : дис. д-р тех. наук : 05.03.06. – Мариуполь, 2006. – 437 с.
8. Ворочай Н. Н. Гибридные процессы дуговой и плазменной сварки / Н. Н. Ворочай, В. М. Илюшенко // Сварщик. – 2003. – № 2 (30). – С. 22–27.
9. Белинский С. М. Оборудование для сварки неплавящимся электродом в среде инертных газов / С. М. Белинский. – Л. : Энергия, 1975. – 980 с.