

## Особенности плавления присадочного и основного металла при плазменной сварке в аспекте создания систем автоматического управления

А.А.О.Аль-Шамки<sup>1</sup>, А.Ф.Шепелев<sup>2</sup>, В.И.Финаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

<sup>2</sup> Политехнический институт Донского государственного технического университета, Таганрог

**Аннотация:** в статье обоснована актуальность исследований для решения задач проектирования систем автоматического управления процессами сварки. Определена цель проведения экспериментов для получения эмпирических зависимостей параметров сварки, которые могли бы быть применены для идентификации параметров передаточной функции системы автоматического управления. Выполнен краткий обзор аналогичных научных работ. Приведено описание механизма шунтирования, выполнено исследование его влияние на эффективность процесса сварки. Получен ряд эмпирических зависимостей изменений параметров плазменной сварки от условий применения присадочной проволоки.

**Ключевые слова:** плазменная сварка, присадочная проволока, система управления, шунтирование, плазмообразующий газ, экспериментальные зависимости.

**Актуальность и цель исследования.** Автоматическое управление процессами сварки является сложной и актуальной задачей, т.к. сварка металлов применяется достаточно широко при создании различных металлических конструкций и разного рода изделий из металла. Работа над созданием систем автоматического управления сварочными процессами ведется уже достаточно давно, создано разного рода сварочное оборудование, сварочные автоматы и полуавтоматы [1 - 3]. Необходимость проведения дальнейших исследований и проектирования систем автоматического управления процессами сварки определена тем, что сварка связана с процессами плавления, т.е. металл в зоне соединения нагревается до расплавления.

При сварке образуется дуга и фактически управлять следует электрическими параметрами, вызывающими процесс образования дуги, а аналитические модели такого объекта, как электрическая дуга, не существуют.

Найти более или менее пригодные модели для процесса сварки можно только на основе выполнения экспериментов, а учитывая, что свариваемый материал может быть самого разного вида и свойств и условия процесса сварки также могут быть разными, то найденные эмпирические модели будут иметь конкретное назначение [4, 5].

Следовательно, и автоматические модели для управления сварочным процессом будут иметь свою специфику, определенную условиями проведенного эксперимента, т.е. могут быть применены для задачи сварки конкретного материала и в конкретных условиях.

Исходя из вышеизложенного, можно утверждать, что исследование особенностей плавления присадочного и основного металла при плазменной сварке является актуальной задачей в аспекте дальнейшего создания системы автоматического управления для плазменной сварки.

Цель статьи состоит в исследовании процесса плазменной сварки металла с применением присадочного материала и получения эмпирических зависимостей для идентификации модели объекта управления.

**Введение.** При синтезе систем автоматического управления применяются методы теории автоматического управления [6, 7]. Система автоматического управления в общем виде представлена схемой, показанной на рис .1.

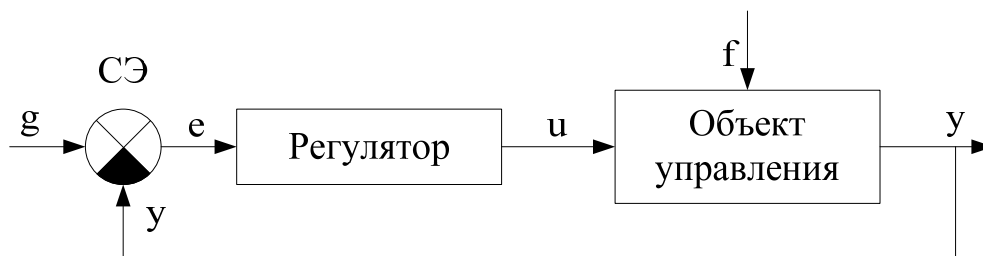


Рис. 1. Структура системы автоматического управления

Объект управления при плазменной сварке металла - динамический процесс, управление поведением которого и будет в дальнейшем целью синтеза системы автоматического управления [6]. Модель объекта

управления должна быть представлена в виде зависимости выходного параметра от состояния, управляющего воздействия и возможных возмущений. Для поиска этой зависимости и будут выполнены эксперименты.

В системах автоматического управления применяются разного рода регуляторы, представляющие собой динамические звенья системы управления: пропорциональное звено, дифференцирующее звено, типовые звенья первого порядка (интегрирующее звено, инерционное звено, реальное дифференцирующее звено, интегродифференцирующее звено), типовые звенья второго порядка (колебательное звено, апериодическое звено). Для данных звеньев известны передаточные функции, которые можно найти в работе [6].

Однако, применение в качестве регуляторов вышеназванных динамических звеньев даст положительные результаты при известной математической модели объекта управления. Если же управление приходится осуществлять в условиях неопределенности, то следует применять гибридные регуляторы. Например, в работе [8] показано применение гибридного регулятора, при применении теории автоматического управления и методов представления и обработки знаний, в частности, семантических сетей для обработки естественного языка и нейронных сетей для распознавания и кластеризации образов. Достаточно подробно архитектура систем управления с интеллектуальными гибридными регуляторами рассмотрена в работе [9].

Для синтеза системы автоматического управления плазменной сваркой металла следует решать задачу оценивания состояний для организации оптимального управления сваркой, т.е. следует знать всю информацию о текущих значениях переменных состояния объекта управления и значения вектора состояния. Управление методами классической теории

---

автоматического управления несложно реализовать, если выполнена оценка неизмеримых возмущений, т.е. их измерение, а в реальных условиях плазменной сварки это, попросту неосуществимо.

Поэтому предлагается решать задачу управления на основе априорной информации о модели процесса дуговой сварки, т.е. на основе текущих измерений сигналов входов и выходов.

В системах автоматического управления можно применять оценки состояний объекта управления, полученные с применением метода фильтрации. Оценки получают при выполнении измерений параметров в режиме реального времени. В этом случае модель объекта может рассматриваться в виде уравнений состояний:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= A(t)x(t) + B(t)u(t) + f(t), \\ y(t) &= C(t)x(t) + v(t), \quad x(t_0) = x_0, \quad t \geq t_0,\end{aligned}\tag{1}$$

где  $x(t) \in R^n$  - вектор состояния объекта управления;  $u(t) \in R^m$ ,  $y(t) \in R^l$  - входной и выходной векторы;  $A(t)$ ,  $B(t)$ ,  $C(t)$  - заданные матричные функции.

Действие возмущений определено функцией  $f(t)$ , а погрешность измерений – функцией  $v(t)$ . При работе системы автоматического управления будут измеримыми сигналы  $u(t)$ ,  $y(t)$ , а процессы  $x(t)$ ,  $f(t)$  и  $v(t)$  измерить нельзя. Задача состоит в поиске оценок  $\hat{x}(t)$  состояния объекта управления так, чтобы выполнялось асимптотическое условие  $\hat{x}(t) \rightarrow x(t)$ . Всегда существуют ошибки оценивания из-за возмущений и шумов измерений.

Это один подход к задаче синтеза системы автоматического управления процессом дуговой сварки, но его результат его применения определяется степенью непредсказуемости оценок. Другой подход основан на применении разгонных характеристик [6, 7].

Исследование установки для плазменной сварки и представление её компонент в виде передаточных функций, позволит получить модель установки, например, в следующем виде:

$$W(p) = \frac{ke^{-\tau p}}{(1 + T_1 p)(1 + T_2 p)}, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент передачи;  $\tau$  - время запаздывания - время, за которое тепловая энергия распространяется от дуги к металлу;  $T_1$  и  $T_2$  - постоянные времени.

Передаточная функция (2) в данном случае является параметрической моделью, т.е. её неизвестные параметры  $k$ ,  $\tau$ ,  $T_1$  и  $T_2$  должны быть определены.

В качестве разгонных характеристик могут быть приняты вольтамперные характеристики, например, зависимости тока шунтирования от разности потенциалов плазмы между присадочными проволоками при выполнении плазменной сварки в газовой среде с подачей присадочной проволоки, и другие эмпирические зависимости. В этом случае для конкретного применения плазменной сварки можно рассчитать параметры регуляторов и обеспечивать автоматическое управление сваркой с требуемыми критериями качества при разных параметрах выбираемого термического режима [10].

Именно поэтому выполнению опытов для исследования процессов дуговой сварки с целью получения эмпирических характеристики и уделяется внимание в данной статье.

**Аналитический обзор результатов исследования процессов дуговой сварки.** Рассматривать будем плазменную сварку, которая может происходить с применением присадочного материала, но вначале выполним аналитический обзор аналогичных научных работ.

Известно, что при плазменной сварке на прямой полярности в газовой среде при осуществлении подачи присадочной проволоки по оси проявляется процесс шунтирования тока плазменной дуги [11]. Течение тока плазменной дуги по присадочной проволоке в зависимости от его величины может оказывать влияние на процессы плавления и переноса электродного металла.

Процесс шунтирования дуги через шлак при наплавке под флюсом достаточно подробно описан в источнике [12]. Механизм шунтирования заключается в следующем. Проволока, погружаясь в плазму, будет иметь потенциал, равный потенциалу наиболее отрицательной точки плазмы, в контакте с которой она находится, т.е. это будет потенциал точки входа проволоки в плазму.

Поставим и приведем описание таких условий опытов с применением плазменной сварки, которые обеспечат качественный результат сваривания металла.

В дуге величина потенциала будет изменяться по длине столба таким образом, что потенциал любой точки столба, расположенной ближе к аноду, будет меньше потенциала точки входа присадочной проволоки в плазму. Таким образом, в области торца проволоки между окружающей торец проволоки плазмой и самой проволокой всегда существует разность потенциалов. Эта разность потенциалов определится по следующей формуле:

$$U_{э-пл} = \int_{l=L_1}^{l=L_2} E(l)dl, \quad (3)$$

при  $E=const$   $U_{э-пл}=E \cdot L_{пл}$ , где  $E$  - градиент потенциала в столбе дуги (В/м),  $L_{пл}$  - глубина осевого погружения проволоки в плазму (м).

Если же разность потенциалов между проволокой и плазмой будет недостаточной для эмиссии электронов в плазму, то ток, протекающий по проволоке, определяется количеством положительных ионов, нейтрализующихся на поверхности проволоки. Если же разность

потенциалов окажется достаточной для образования катодного пятна на расплавленном торце проволоки, то часть тока дуги шунтируется проволокой [11]. По истечении определенно времени  $t$  проволока получает количество тепла при падении энергии в зоне катодного падения напряжения у торца проволоки и, согласно закону Джоуля-Ленца, что определяется протекающим по проволоке током.

Если глубина погружения проволоки в плазму увеличивается, то соответственно возрастает и площадь поверхности проволоки, которая вступает в контакт с плазмой. В результате интенсифицируется процесс плавления проволоки. Если растет глубина погружения присадочной проволоки в плазму и дальше, то разность потенциалов между проволокой и плазмой в области торца проволоки достигнет значения, равного сумме анодного и катодного падений напряжений на проволоке. В результате этого произойдет двойное дугообразование, вызывающее разряды между катодом плазмотрона и проволокой и между торцом проволоки и изделием. Таким образом, плазменная дуга будет полностью шунтирована проволокой. Также происходит нарушение равенства между скоростью подачи присадочной проволоки и скоростью её плавления, что приводит к проявлению нестабильности горения разрядов и будет нестабильным процесс формирования сварного шва.

Анализируя условия погружения присадочной проволоки в плазму, делаем вывод, что обеспечить высокую производительность и стабильность процесса плазменной сварки с присадочной проволокой можно следующим образом. Процесс погружения присадочной проволоки в плазму следует выполнять так, чтобы разность потенциалов между проволокой в точке входа её в плазму, и плазмой в области торца проволоки превышала величину катодного падения на присадочной проволоке. Условие реализации

---

требуемого процесса погружения присадочной проволоки в плазму связано с выполнением следующего неравенства:

$$U_{\kappa} + U_a > U_{\text{э-пл}} > U_{\kappa}, \quad (4)$$

где  $U_{\kappa}$  и  $U_a$  – катодное и анодное падения напряжения на присадочной проволоке, выраженное в В.

Значение падения напряжения между проволокой и плазмой  $U_{\text{э-пл}} = E \cdot L_{\text{пл}}$ , тогда:

$$U_{\kappa} + U_a > E \cdot L_{\text{пл}} > U_{\kappa}, \quad (4)$$

где  $L_{\text{пл}}$  – длина плазменной дуги;  $E$  – напряженность электрического поля, выраженная отношением В/м.

В результате получаем неравенство для величины длины плазменной дуги:

$$\frac{U_{\kappa} + U_a}{E} > L_{\text{пл}} > \frac{U_{\kappa}}{E}, \quad (6)$$

При проведении исследования процессов сварки с шунтированием присадочной проволокой плазменной дуге в качестве плазмообразующего газа применен газ  $\text{CO}_2$ . При таких условиях сварки будет получена дуга, которая имеет высокий градиент потенциала в столбе. В результате связь между глубиной осевого погружения присадочной проволоки в плазму и величиной тока шунтирования проявиться в достаточно большей степени.

Согласно условию неравенства (6) при применении плазмообразующего газа  $\text{CO}_2$  допустимая глубина осевого погружения присадочной проволоки в плазму существенно ограничена. Если ограничивать, т.е. сокращать глубину осевого погружения проволоки в плазму при неизменных прочих условиях, то это приведет к значительному росту расстояния  $L_{\text{пр-и}}$  между торцом присадочной проволоки и изделием, а также к интенсивному выгоранию легирующих элементов в присадочной проволоке.



С учетом вышесказанного для реализации эффективного процесса сваривания металла, способ применения плазменной сварки одновременно должен удовлетворять двум условиям:

$$\text{а) } \frac{U_{\kappa} + U_a}{E} > L_{ni} > \frac{U_{\kappa}}{E}, \quad (7)$$

$$\text{б) } L_{np-u} = \min, \quad (8)$$

где  $L_{np-u}$  – расстояние между торцом проволоки и изделием.

Но по требованиям технологии сваривания минимальное расстояние между проволокой и изделием, а, следовательно, и длина плазменной дуги - технологический параметр, который не зависит от рода плазмообразующего газа. Следовательно, длина плазменной существенно не может быть изменена. Поэтому эффективное применение способа плазменной сварки с осевой подачей присадочной проволоки при использовании в качестве плазмообразующих сред-газов, в которых плазма обладает большим градиентом потенциала и высокой энтальпией, не представляется возможным.

Для исследования процессов имитирования была использована схема, показанная на рис. 2, и рассмотренная в работе [13].

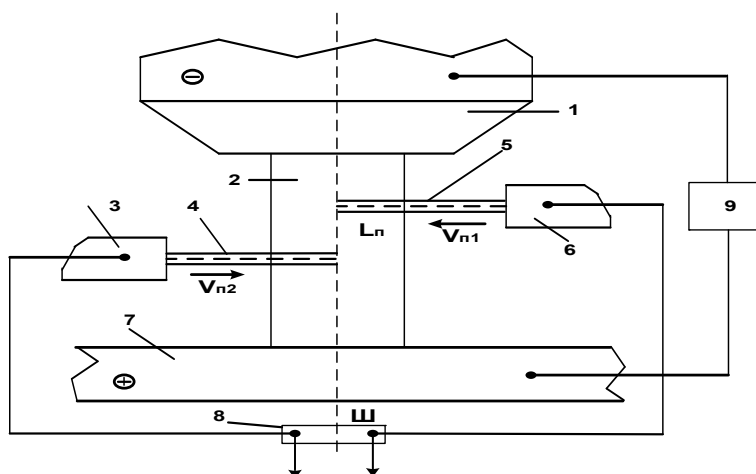


Рис. 2. Схема исследования процессов шунтирования в плазменной дуге: 1 - плазматрон, 2 - столб дуги, 3, 6 - направляющие наконечники, 4, 5 - присадочные проволоки, 7 - свариваемое изделие, 8 - измерительный шунт, 9 - источник питания плазменной дуги

В схеме для исследования процессов шунтирования в плазменной дуге показано, что через направляющие наконечники 3 и 6, установленные перпендикулярно оси столба дуги 2, подаются в дугу 2 две присадочные проволоки 4 и 5 со скоростью подачи  $V_{П1}$  и  $V_{П2}$ . Подача проволоки происходит таким образом, что расстояние между векторами подачи проволоки равняется некоторой величине  $L_{П}$ . Причем, скорости подачи присадочных проволок выбирается в зависимости от величины тока плазмы таким образом, что оба торца проволоки находятся на оси столба дуги.

Для чистоты эксперимента в плане обеспечения при измерениях, защищенных от влияния помех измерительные цепи, выполнены в виде экранированных витых пар.

Эксперимент поставлен таким образом, что две присадочные проволоки электрически связаны через шунт I (см. рис. 2). В этом случае подача присадочной проволоки при сварке происходит так, что потенциалы плазмы в точке входа проволоки в плазму и в области её торца имеют некоторую разность, и это реализуется при погружении присадочной проволоки в столб плазменной дуги в осевом направлении.

На рис. 3 показана полученная в результате выполненного эксперимента зависимость величины тока шунтирования от разности потенциалов между присадочными проволоками. Измерения разности потенциалов  $\Delta U_{Э-Э}$  между проволоками осуществляли при разомкнутой цепи шунтирования.

Полученные данные показали, что при небольшом расстоянии между присадочными проволоками, при разности потенциалов  $\Delta U_{Э-Э} < U_K$  величина тока шунтирования незначительна и не превышает 4 – 6 А (нижний участок кривой на рис. 3).

При достижении разности потенциалов  $\Delta U_{Э-Э}$  значения напряжения  $U_K$ , происходит образование катодного пятна на торце нижней присадочной

---

проволоки, что привело к скачкообразному росту тока шунтирования  $I_{ш}$ , что показано в виде перелома кривой зависимости на рис. 3.

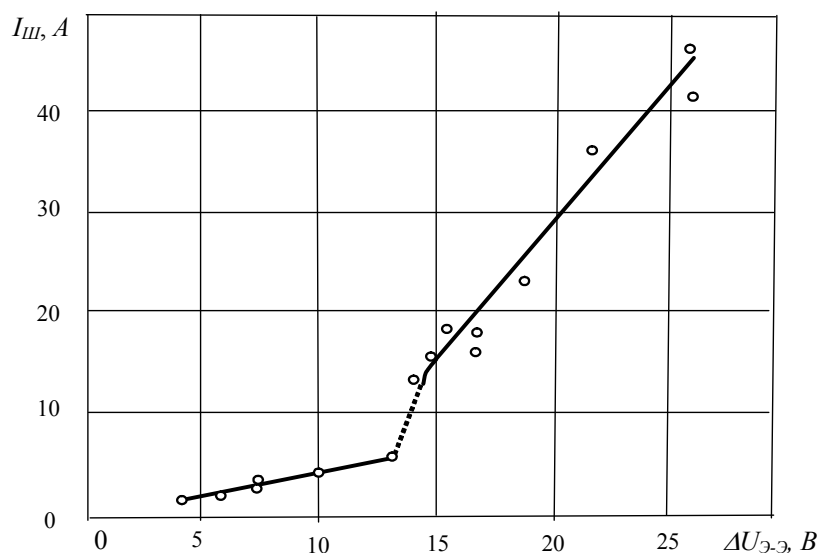


Рис. 3. Зависимость тока шунтирования  $I_{ш}$  от разности потенциалов плазмы между присадочными проволоками ( $\Delta U_{э-э}$ )  $I_{пл}=180 - 200 A$ ;  $d_c=8$  мм;  $g_{пл.э}=0,66$  г/с;  $d_{пр}=2,0$  мм, прямая полярность

Если и дальше увеличивать расстояние между присадочными проволоками, то разность потенциалов  $\Delta U_{э-э}$  будет превышать напряжение  $U_K$ , а ток шунтирования  $I_{ш}$  будет возрастать практически линейно в большем коэффициентом пропорциональности и будет достигать нескольких десятков ампер.

Можно сделать вывод, что шунтирование плазменной дуги с применением присадочной проволокой по схеме организации сварки 2 приводит к тому, что на перенос присадочного металла помимо скоростного напора плазменного потока начинает оказывать влияние и электродинамическая сила.

На рис. 4 показана полученная зависимость изменения критического тока плазменной дуги  $I_{пл,кр}$  от глубины осевого погружения присадочной

проволоки в плазму  $L_n$ , при котором происходит переход к струйному переносу присадочного материала.

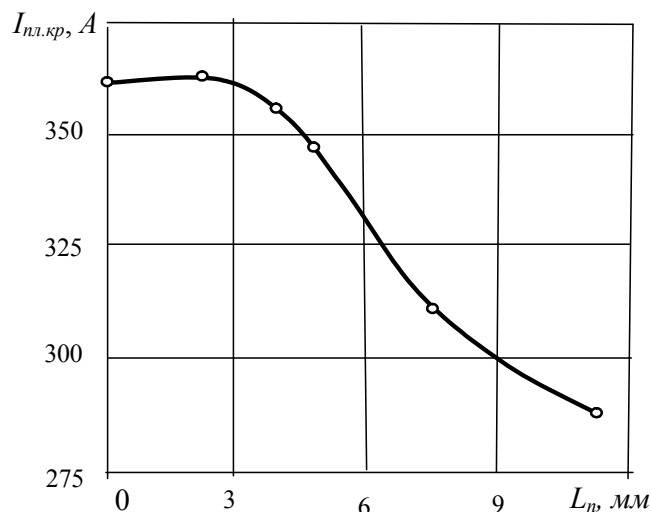


Рис. 4. Зависимость критического тока плазменной дуги от глубины осевого погружения присадочной проволоки в плазму:  $d_c=10$  мм;  $g_{пл.г}=0,66$  г/с;  $L_{c-u}=30$  мм полярность прямая,  $d_{np}=1,6$  мм (проволока Св08Г2С), положение точки плавления проволоки: по вертикали – 15 мм от среза сопла, по горизонтали – 5 мм от оси сопла

Полученная зависимость показала, что при достижении определенной глубины погружения присадочной проволоки в плазму критический ток плазменной дуги будет существенно понижен. Направление и скорость подачи присадочной проволоки выбирались так, чтобы во всех экспериментах плавление присадочного металла происходило в одной и той же точке относительно сопла плазмотрона.

Полученные результаты исследований соответствуют ранее рассмотренным результатам реализации способов плазменной сварки [14 - 16], в которых показано применение в технологических целях эффекта шунтирования по схемам процесса плазменной сварки в газе  $CO_2$  при плавлении присадочной проволоки, показанных на рис. 5.

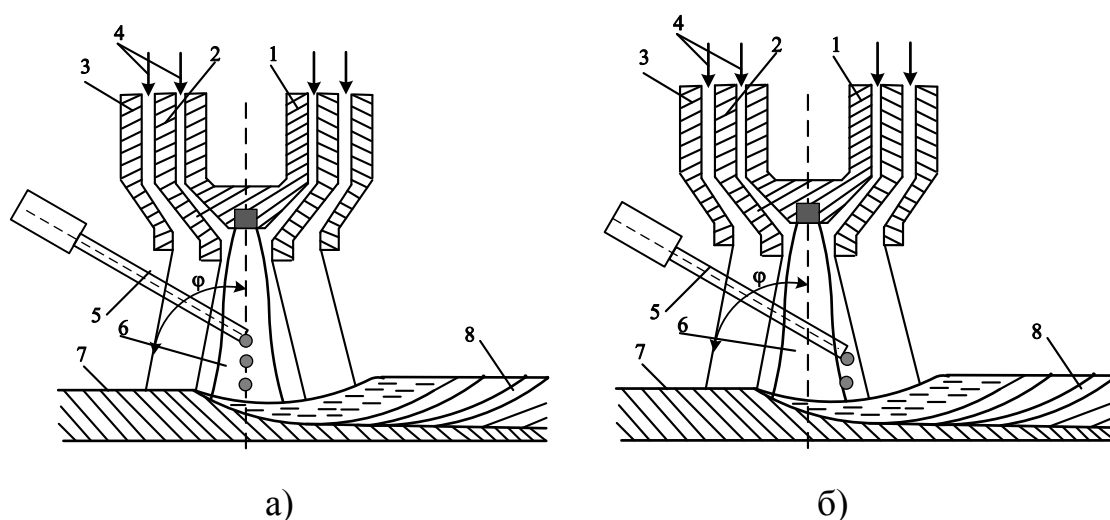


Рис. 5. Схемы процесса плазменной сварки в  $CO_2$  при плавлении присадочной проволоки в столбе дуги (а) и на выходе из столба (б): 1 - электрод; 2 - формирующее сопло; 3 - защитное сопло; 4 - плазмообразующий и защитный газы; 5 - присадочная проволока; 6 - дуга; 7 - изделие; 8 - шов

Эксперименты по схемам на рис. 5 выполняются при двух условиях: (6) и (8). Выполнение этих условий обеспечено тем, что при плазменной сварке в плазменную дугу прямого действия и при прямой полярности присадочные проволоки подаются между формирующим соплом и изделием под углом к продольной оси столба дуги. Угол  $\varphi$  между продольной осью столба плазменной дуги и направлением присадочного материала задается в диапазоне значений его тангенса:

$$\frac{E_{dc}}{U_K} > \operatorname{tg}\varphi > \frac{E_{dc}}{U_K + U_a}, \quad (9)$$

где  $E_{dc}$  – потенциал между дугой и соплом;  $E_{dk}$  - потенциал между дугой и катодом.

Соблюдение условия (9) при применении в качестве плазмообразующих сред газов, в которых плазма обладает большим градиентом потенциала и высокой энтальпией, обеспечивает образование области катодного падения напряжения на присадочной проволоке, па это обеспечивает высокую эффективность ее плавления и позволяет

поддерживать минимальное расстояние между торцом проволоки и изделием.

На рис. 6 показан результат выполненного эксперимента, показывающий, что при выполнении этих условий сварки производительность расплавления присадочной проволоки значительно возрастает.

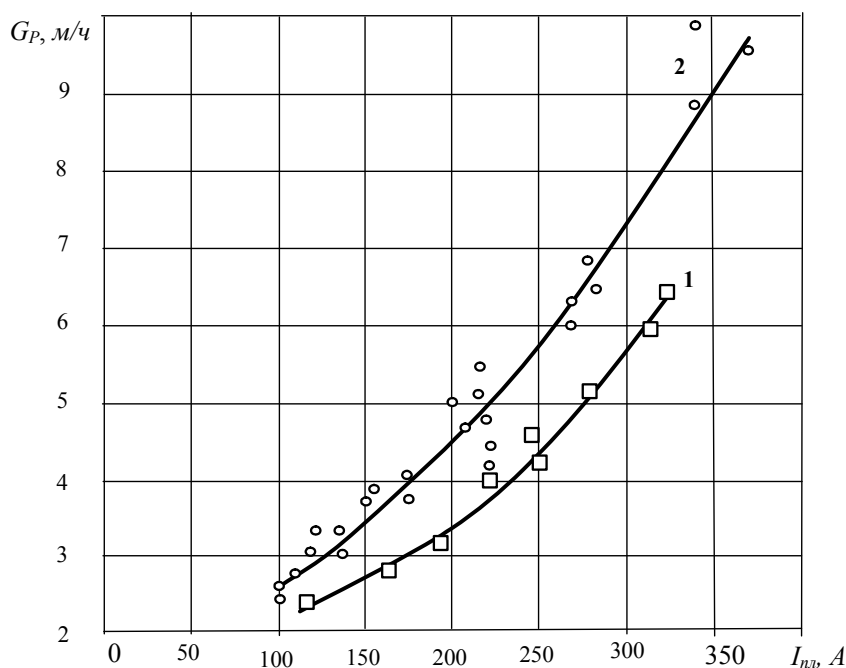


Рис. 6. Зависимость массовой скорости плавления от тока плазменной дуги: 1 -  $\varphi=90^\circ$ ; 2  $\varphi=40^\circ$  при  $d_c=8,0$  мм:  $g_{нл.э}=0,66$  г/с;  $d_{np}=1,6$  мм (проволока Св08Г2С): полярность – прямая

Приращение производительности плавления присадочной проволоки возрастает с большим коэффициентом пропорциональности с ростом тока плазменной дуги. Объяснение такой зависимости состоит в том, что при больших токах наблюдается изгиб присадочной проволоки, что приводит к увеличению глубины погружения проволоки в плазму, а это увеличивает величину тока шунтирования. Таким образом, получили хорошую производительность плавления присадочной проволоки.

Выполненные эксперименты показали, что при плазменной сварке с боковой подачей присадочной проволоки производительность наплавки и характер переноса присадочного металла могут регулироваться в широком диапазоне отдельно с регулировкой тока плазменной дуги. В результате появляется возможность управления формой сварного шва с применением соответствующей системы автоматического управления подачей присадочной проволоки. Также в результате экспериментов выявлено, что максимально возможная для задаваемого тока плазменной дуги производительность плавления присадочного металла зависит от положения торца присадочной проволоки. Если направляющий мундштук жестко зафиксирован относительно плазмотрона, положение торца присадочной проволоки относительно изделия будет определено расстоянием между плазмотроном и изделием ( $L_{c-u}$ ).

На рис. 7 показана полученная в результате экспериментов зависимость возможной скорости плавления присадочного металла от величины  $L_{c-u}$ .

Результаты опытов показали, что при уменьшении расстояния  $L_{c-u}$  до величины, обеспечивающей контакт торца присадочной проволоки с жидким металлом сварочной ванны, т.е. при длине  $L_{np-u}=0$  ( $L_{c-u}=12 - 12,5$  мм) в пределах токопроводящего канала столба дуги, происходит переход активного пятна с основного на присадочный металл и производительность его плавления значительно возрастает (см. рис. 8, 9).

Также выполнением видеосъемки получено подтверждение перехода активного пятна с основного на присадочный металл. Диаграммы на осциллографе показали, что напряжение между проволокой и изделием в момент короткого замыкания скачкообразно снижается на величину падения напряжения в активном пятне (см. рис. 7).

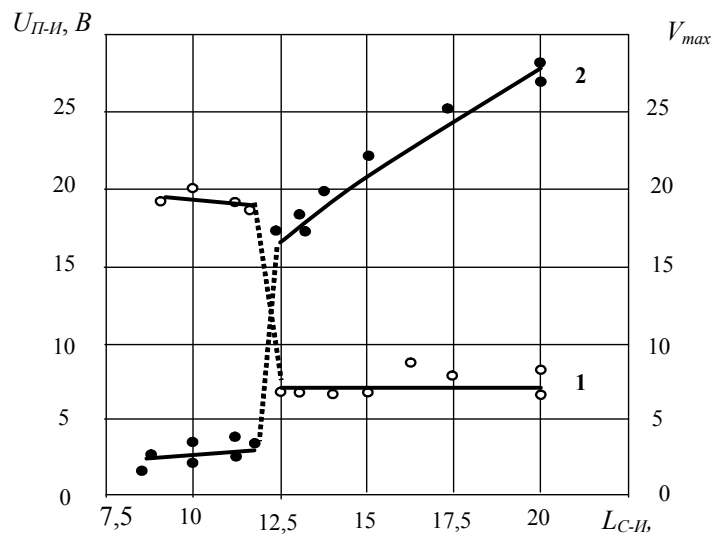


Рис. 7. Зависимость максимально возможной скорости  $V_{max}$  плавления присадочной проволоки и напряжение между проволокой и изделием  $U_{n-u}$  от расстояния плазмотрон-изделие  $L_{c-u}$ : 1 -  $V_{max}=f(L_{c-u})$ ; 2 -  $U_{n-u}=f(L_{c-u})$ ;  $I_{nl}=210$  А, прямая полярность;  $d_c=8$  мм;  $d_{np}=1,6$  мм (проволока Св08Г2С);  $g_{nl.z}=0,2$  г/с

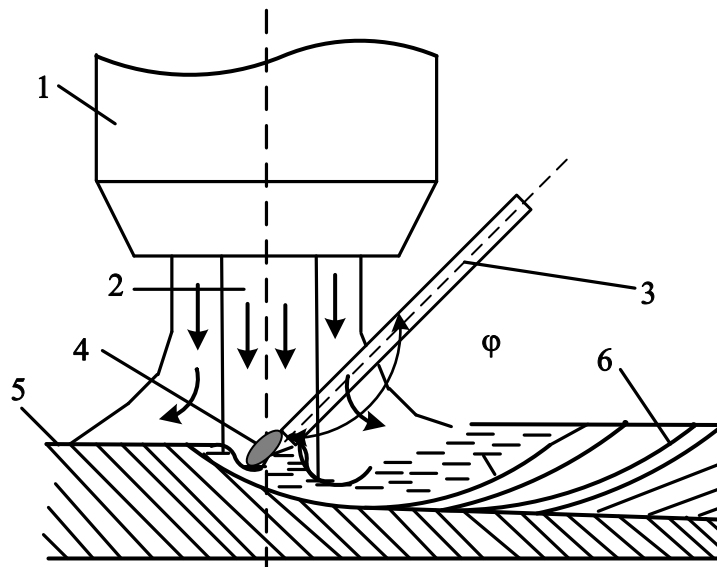


Рис. 8. Схема процесса плазменной сварки при замыкании торца присадочной проволоки на сварочную ванну: 1 - плазмотрон; 2 - дуга; 3 - проволока; 4 - активное пятно; 5 - изделие; 6 - шов



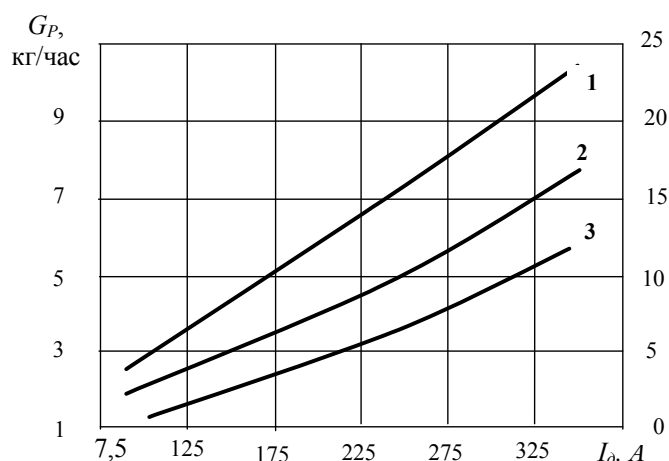


Рис. 9. Зависимость производительности плавления присадочной и электродной проволоки от тока дуги: 1 - плазменная сварка в  $\text{CO}_2$  (контакт торца присадочной проволоки с изделием в области токопроводящего канала столба дуги); 2 - плазменная сварка в  $\text{CO}_2$  (плавление присадочной проволоки в столбе дуги) при  $d_c=8$  мм;  $g_{нл.э}=0,23$  г/с;  $d_{np}=1,6$  мм;  $V_{св}=40$  м/час, прямая полярность;  
3 - сварка плавящимся электродом в  $\text{CO}_2$ ;  $d_{np}=d_э=1,6$  мм.

**Выводы.** Выполненные исследования и полученные экспериментальные данные в виде зависимостей представляют интерес для синтеза системы автоматического управления процессом плазменной сварки.

Приведено описание механизма шунтирования и исследовано его влияние на эффективность процесса сварки. Получена зависимость изменения тока шунтирования. Также исследовано влияние особенностей применения присадочной проволоки. Получена эмпирическая зависимость критического тока плазменной дуги от глубины осевого погружения присадочной проволоки в плазму, зависимость массовой скорости плавления от тока плазменной дуги, зависимость максимально возможной скорости плавления присадочной проволоки и напряжение между проволокой и изделием и зависимость производительности плавления присадочной и электродной проволоки от тока дуги. Все полученные эмпирические зависимости предполагается применить при синтезе системы автоматического управления плазменной сваркой.

Для этого выполняется аппроксимация эмпирических зависимостей известными аналитическими выражениями, которые могут быть приняты за разгонные характеристики для идентификации параметров передаточной функции системы автоматического управления сваркой.

### Литература

1. Томас К.И., Ильященко Д.П. Технология сварочного производства: учебное пособие; Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 247 с.

2. Установка для плазменной сварки УПС 804 УХЛ4. URL: [weldzone.info/oborudovanie/machines/95-plasma-welding/293-plasma-welding-facility](http://weldzone.info/oborudovanie/machines/95-plasma-welding/293-plasma-welding-facility)

3. Мещеряков В.М., Косенко Е.Е., Косенко В.В., Крымский В.С. Обзор способов сварки элементов кузовов автомобилей // Инженерный вестник Дона, 2018, № 1 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4702](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4702).

4. Шевелев А.Ф., Тертышная З.В., Медведчикова Н.Н. Потери на разбрызгивание, испарение и окисление металла / Аспекты развития науки, образования и модернизации промышленности: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием. Технические науки (Таганрог, 20-21 апреля 2017 г.); Донской гос. техн. ун-т. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2017. – С. 278 – 281.

5. Шевелев А.Ф., Тертышная З.В., Исследование технологических характеристик плазменной дуги в  $CO_2$  / Аспекты развития науки, образования и модернизации промышленности: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием. Технические науки (Таганрог, 20-21 апреля 2017 г.); Донской гос. техн. ун-т. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2017. – С. 277 – 278.

6. Гайдук А.Р. Теория автоматического управления. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 208 с.
  7. Воронков А.А. Основы теории автоматического управления: Автоматическое регулирование непрерывных линейных систем. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1980. – 312 с.
  8. Гаврилов А.В., Губарев В.В., К.Х. Х.Х. Джо, Ли. Архитектура гибридной системы управления мобильного робота / Научный вестник НГТУ. – № 2. – Новочеркасск, Изд-во НГТУ, 2004. – С. 1 – 12.
  9. Funabashi M. Fuzzy and neural hybrid expert systems: synergetic AI / AI in Japan; IEEE Expert. 1995. - pp. 32 – 40.
  10. Куликов В.П. Технология сварки плавлением и термической резки: учебник. - Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2016. - 463 с.
  11. Esserss W.G., Jelmorini G., Tichlaarr G.W. Arc characteristics and metal transfer with plasma-MIG welding / Metal construction and British Welding Journal, 1972, №12. - pp. 439 – 447.
  12. Шевелев А.Ф., Тертышная З.В., Тетерин Ю.Е., Резников И.О. Исследование переноса присадочного металла при плазменной сварке в CO<sub>2</sub> / Аспекты развития науки, образования и модернизации промышленности: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием. Технические науки (Таганрог, 20-21 апреля 2017 г.); Донской гос. техн. ун-т. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2017. – С. 270 – 274.
  13. Аль-Шамки А.А.О., Шепелев А.Ф., Финаев В.И., Пушнина И.В. Исследование радиального распределения плотности тока в анодном пятне плазменной дуги // Инженерный вестник Дона, 2019, №1. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_11\\_Shepelev.pdf\\_27779dd8e8.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_11_Shepelev.pdf_27779dd8e8.pdf).
  14. Ерохин А.А. Кинетика металлургических процессов дуговой сварки. - М.: Машиностроение, 1961. - 256 с.
-

15. DuPont John N., Lippold John C., Kiser Samuel D. Welding Metallurgy and Weld ability of Nickel-Base Alloys. - Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2009. – 440 p.

16. Lippold John C. Welding Metallurgy and Weld ability. - John Wiley & Sons, Inc., 2015. XVIII. - 401 p.

### References

1. Tekhnologiya svarochnogo proizvodstva. [Welding technology]: uchebnoye posobiye. Tomas K.I., Il'yashchenko D.P.; Yurginskiy tekhnologicheskii institut. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2011. 247 p.

2. Ustanovka dlya plazmennoy svarki UPS 804 UKHL4. [Installation for plasma welding of UPS 804 UHL4]. URL: [weldzone.info/oborudovanie/machines/95-plasma-welding/293-plasma-welding-facility](http://weldzone.info/oborudovanie/machines/95-plasma-welding/293-plasma-welding-facility).

3. Meshcheryakov V.M., Kosenko E.E., Kosenko V.V., Krymsky V.S. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4702](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4702).

4. Shevelev A.F., Tertyshnaya Z.V., Medvedchikova N.N. Aspekty razvitiya nauki, obrazovaniya i modernizatsii promyshlennosti: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunarodnym uchastiyem. Tekhnicheskiye nauki (Taganrog, 20-21 aprelya 2017 g.); Donskoy gos. tenkh. un-t. – Rostov-na-Donu: DGTU, 2017. pp. 278 – 281.

5. Shevelev A.F., Tertyshnaya Z.V. Aspekty razvitiya nauki, obrazovaniya i modernizatsii promyshlennosti: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunarodnym uchastiyem. Tekhnicheskiye nauki (Taganrog, 20-21 aprelya 2017 g.); Donskoy gos. tenkh. un-t. – Rostov-na-Donu: DGTU, 2017. pp. 277 – 278.

6. Gayduk A.R. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. [The theory of automatic control]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2004. – 208 p.

---

7. Voronkov A.A. Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya. [Fundamentals of the theory of automatic control]: Avtomaticheskoye regulirovaniye nepreryvnykh lineynykh sistem. 2-ye izd., pererab. M.: Energiya, 1980. – 312 p.

8. Gavrilov A.V., Gubarev V.V., K.KH. KH.KH. Dzho, Li. Nauchnyy vestnik NGTU. № 2. Novocherkassk, Izd-vo NGTU, 2004. pp. 1 – 12.

9. Funabashi M. Fuzzy and neural hybrid expert systems: synergetic AI / AI in Japan; IEEE Expert. 1995. pp. 32 – 40.

10. Kulikov V.P. Tekhnologiya svarki plavleniyem i termicheskoy rezki. [Technology of fusion welding and thermal cutting]: uchebnik. Minsk: Novoye znaniye; M.: INFRA-M, 2016. 463 p.

11. Esserss W.G., Jelmorini G., Tichlaarr G.W. Metal construction and British Welding Journal, 1972, №12. - pp. 439 – 447.

12. Shevelev A.F., Tertyshnaya Z.V., Teterin YU.Ye., Reznikov I.O. Aspekty razvitiya nauki, obrazovaniya i modernizatsii promyshlennosti: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunarodnym uchastiyem. Tekhnicheskiye nauki (Taganrog, 20-21 aprelya 2017 g.); Donskoy gos. tenkh. un-t. Rostov-na-Donu: DGTU, 2017. – pp. 270 – 274.

13. Al'-Shamki A.A.O., Shepelev A.F., Finayev V.I., Pushnina I.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2019, № URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_11\\_Shepelev.pdf\\_27779dd8e8.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_11_Shepelev.pdf_27779dd8e8.pdf).

14. Yerokhin A.A. Kinetika metallurgicheskikh protsessov dugovoy svarki. [Kinetics of metallurgical processes of arc welding]. M.: Mashinostroyeniye, 1961. 256 p.

15. DuPont John N., Lippold John C., Kiser Samuel D. Welding Metallurgy and Weld ability of Nickel-Base Alloys. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2009. 440 p.



16. Lippold John C. Welding Metallurgy and Weld ability. - John Wiley & Sons, Inc., 2015. XVIII. - 401 p.