

УДК 621.791.754'293

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА НА  
ПРОСТРАНСТВЕННУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ДУГИ  
ПРИ СВАРКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ  
НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В СРЕДЕ АРГОНА**

А.С. Киселев, А.С. Гордынец

Томский политехнический университет

E-mail: tskweld@mail.ru

**Киселев Алексей Сергеевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» Института неразрушающего контроля ТПУ. E-mail: tskweld@mail.ru  
Область научных интересов: управление параметрами режима дуговой и контактной сварки.

**Гордынец Антон Сергеевич**, инженер, ассистент кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» Института неразрушающего контроля ТПУ. E-mail: mnet@inbox.ru  
Область научных интересов: оборудование и процессы дуговой сварки.

Приведены результаты исследований по влиянию амплитудной модуляции переменного прямоугольного тока на пространственную устойчивость дуги при сварке алюминиевых сплавов неплавящимся электродом в среде аргона. Показано, что увеличение тока обратной полярности до 10 А и более способствует расширению зоны перемещения катодных пятен и, следовательно, большему отклонению дуги от оси вольфрамового электрода. Экспериментально установлено, что при сварке алюминиевых сплавов в широком диапазоне действующих значений переменного прямоугольного тока пространственное положение дуги в период протекания тока прямой полярности занимает практически соосное вольфрамовому электроду положение в случае кратковременного ограничения тока дуги обратной полярности до уровня 5 А на завершающем этапе её горения.

**Ключевые слова:**

Дуговая сварка, алюминиевые сплавы, неплавящийся электрод, переменный прямоугольный ток, амплитудная модуляция.

**Ведение**

Тепловая энергия электрической дуги передается электроду и свариваемому изделию в основном активными пятнами и газовыми потоками. Блуждание активных пятен по поверхности электрода и изделия, а также отклонение столба дуги от оси электрода приводит к рассредоточению тепловых потоков, что является причиной нарушения стабильности плавления свариваемого металла [1]. В большей степени это проявляется при высокой скорости сварки и малой величине тока дуги. Таким образом, одним из факторов, определяющих эффективность процесса сварки, является пространственная устойчивость дуги.

Пространственная устойчивость дуги с неплавящимся электродом определяется скоростью потока плазмы в аксиальном направлении [2, 3]. При увеличении скорости этого потока смещение дуги в поперечном направлении под воздействием внешних сил ограничивается, т. е. пространственная устойчивость дуги возрастает. Одним из способов управления пространственной устойчивостью является воздействие на ее электрические параметры, т. к. с ними взаимосвязаны скорость потока плазмы и давление дуги [2].

Повышению пространственной устойчивости дуги при сварке алюминиевых сплавов неплавящимся электродом в среде аргона способствует применение переменного прямоугольного тока [4]. Об этом косвенно свидетельствуют результаты многочисленных исследований. В работах [5, 6] показано влияние регулируемых параметров режима сварки на характер проплавления изделия из алюминиевого сплава и ширину зоны катодного распыления. В частности, отмечено, что уменьшение тока и длительности горения дуги обратной полярности и соответствующее увеличение аналогичных параметров дуги прямой полярности позволяют увеличить глубину проплавления и уменьшить ширину шва и зоны катодного распыления. При этом давление дуги приобретает явно выраженный пульсирующий характер.

Таким образом, для обеспечения пространственной устойчивости дуги переменного прямоугольного тока необходимо задавать максимальную асимметрию параметров режима горения дуги

прямой и обратной полярностей. Однако при этом возможно снижение качества сварного соединения за счет недостаточного удаления поверхностной оксидной пленки.

Цель работы – определить возможность повышения пространственной устойчивости дуги при сварке алюминиевых сплавов неплавящимся электродом в среде аргона посредством амплитудной модуляции переменного прямоугольного тока.

### Методики проведения исследований, их результаты и обсуждение

Влияние величины тока в период горения дуги обратной полярности на ее пространственную устойчивость изучали при помощи скоростной киносъемки (3000 кадров в секунду). В первом случае ток дуги обратной полярности задавали равным 5 А, во втором – 32 А, в третьем ток модулировали таким образом, что в начале периода он был равен 5 А, а затем дискретно увеличивали до 32 А. Остальные параметры режима приведены в табл. 1. Electroдами служили вольфрамовый пруток марки ЭВЧ диаметром 1,0 мм и пластина из сплава АМг6 размером 100×30×3 мм. Скорость перемещения пластины после возбуждения дуги задавали с учетом образования на её поверхности ванны расплавленного металла.

**Таблица 1.** Параметры режима горения дуги

Ток дуги прямой полярности, А	36
Частота смены полярности, Гц	50
Соотношение периодов горения дуги прямой и обратной полярности	2
Расход защитного газа (аргона), л/мин	5

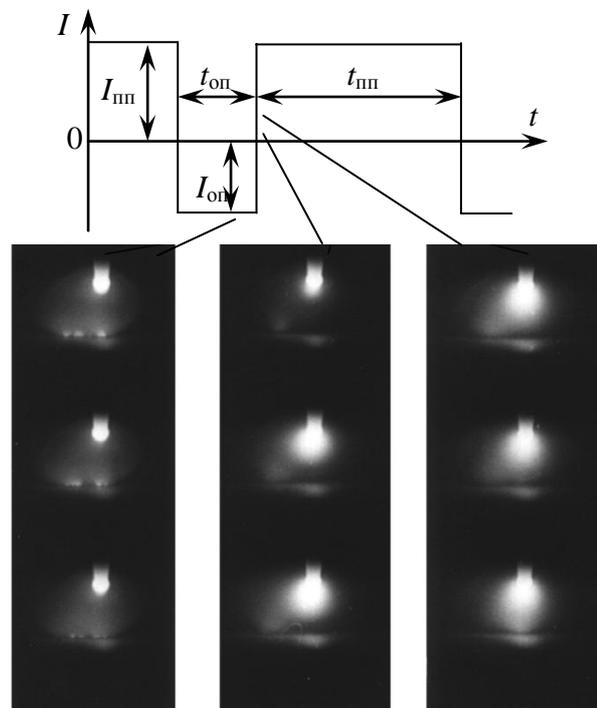
Анализ результатов эксперимента показал, что в период горения дуги обратной полярности при величине тока 5 А катодные пятна интенсивно перемещаются по окисленной поверхности металла, непосредственно прилегающей к расплаву сварочной ванны. При этом ширина зоны катодного распыления поверхностной оксидной пленки впереди и по бокам ванны не превышает 0,3 мм. Увеличение тока дуги обратной полярности до уровня 32 А как в начале периода её горения, так и по истечении некоторого времени способствует расширению зоны интенсивного перемещения катодных пятен по окисленной поверхности. В этом случае ширина зоны катодного распыления и, следовательно, максимальное удаление катодных пятен от расплава сварочной ванны составляет 1,6...1,8 мм. Аналогичный характер изменения ширины зоны перемещения катодных пятен при увеличении тока дуги обратной полярности наблюдается при плавлении торцевой поверхности пластины из алюминиевого сплава. При этом с увеличением тока дуга обратной полярности в большей степени отклоняется от оси вольфрамового электрода, т. к. ее направленность определяется взаимным расположением активных пятен.

Пространственную устойчивость дуги в период протекания тока прямой полярности исследовали при увеличенном расстоянии между электродами с целью визуального определения направления столба дуги по отношению к оси вольфрамового электрода.

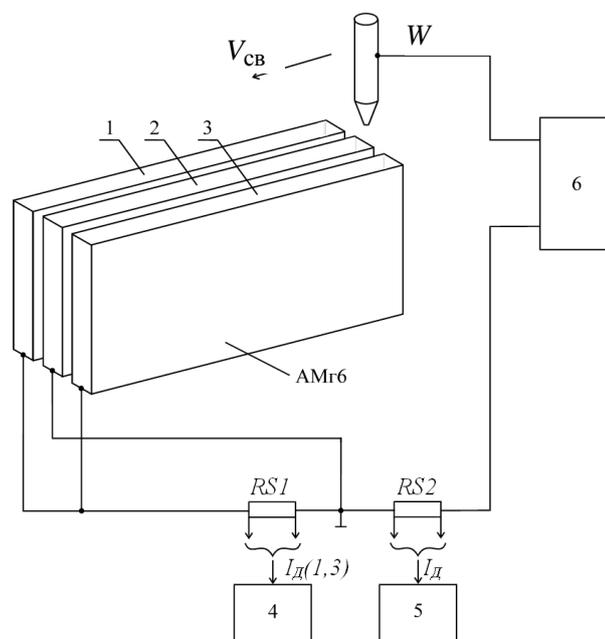
Анализ кинограмм показал, что в начальный период горения дуги прямой полярности (после смены полярности тока с обратной на прямую) её расположение в пространстве совпадает с предыдущим расположением дуги обратной полярности (рис. 1). Это свидетельствует о том, что анодное пятно формируется в месте предыдущего сосредоточения катодных пятен. По истечении некоторого времени, зависящего от степени сосредоточения катодных пятен и их отдаленности от расплава ванны в завершающий период горения дуги обратной полярности, столб дуги прямой полярности занимает практически соосное с вольфрамовым электродом положение.

С целью подтверждения взаимосвязи места формирования анодного пятна на поверхности свариваемого изделия с предыдущим сосредоточением катодных пятен был проведен следующий эксперимент. Суть его заключалась в регистрации тока прямой и обратной полярностей в цепи секционированного изделия, состоящего из трех пластин толщиной 2 мм из сплава АМг6, изолированных друг от друга. При этом центральная пластина располагалась симметрично по отношению к вольфрамовому электроду. Подключение пластин секционированного изделия к сварочной цепи осуществляли через коаксиальные шунты (рис. 2). Зазор между пластинами в процессе оплавления

торцевой поверхности составлял 0,2...0,3 мм. Параметры режима горения дуги переменного прямоугольного тока соответствовали указанным в таблице, а ток дуги обратной полярности задавали равным 32 А.

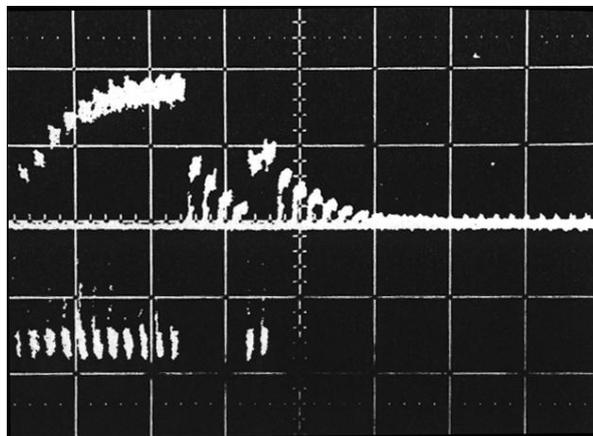


**Рис. 1.** Кинограммы дуги при смене полярности:  $I_{пп}$  – ток дуги прямой полярности (36 А);  $I_{оп}$  – ток дуги обратной полярности (32 А);  $t_{оп}$  – период горения дуги обратной полярности;  $t_{пп}$  – период горения дуги прямой полярности; скорость съемки 3000 кадров/с



**Рис. 2.** Схема подключения секционированного изделия к сварочной цепи: 1, 3 – боковые пластины; 2 – центральная пластина; 4, 5 – осциллографы; 6 – источник переменного прямоугольного тока;  $RS1$ ,  $RS2$  – коаксиальные шунты

Результаты эксперимента показали, что в процессе относительного движения электродов со скоростью, обеспечивающей плавление торцевой поверхности центральной пластины секционированного изделия и частичное оплавление поверхностей боковых пластин, катодные пятна в период горения дуги обратной полярности периодически формируются как на центральной, так и на боковых пластинах (рис. 3).



**Рис. 3.** Осциллограмма тока в цепи боковых пластин секционированного изделия ( $\mu_i = 17,8$  А/дел;  $\mu_t = 0,1$  с/дел)

Кроме того, регистрировались случаи одновременного существования катодных пятен на соседних пластинах. Из этого следует, что в момент повторного возбуждения дуги прямой полярности место формирования анодного пятна, имеющего конечные размеры и плотность тока, определяется предысторией существования дуги обратной полярности.

В частности, если в момент, предшествующий смене полярности, дуга обратной полярности горела между вольфрамовым электродом и боковой пластиной, то анодное пятно при повторном возбуждении дуги прямой полярности стремится также занять положение на этой пластине. Причем площадь охвата поверхности боковой пластины анодным пятном и, следовательно, величина тока прямой полярности, регистрируемая в цепи этой пластины, увеличивается в большей степени в случае преимущественного возбуждения и горения на ней дуги обратной полярности. При последующем изменении характера горения дуги обратной полярности, а именно преимущественном ее горении на центральной пластине, анодное пятно в периоды горения дуги прямой полярности перемещается на центральную пластину.

Таким образом, результаты эксперимента с использованием секционированного изделия согласуются с данными скоростной киносъемки. Отмеченную закономерность поведения дуги в период протекания тока прямой и обратной полярности можно объяснить следующим образом. Известно, что горение дуги обратной полярности на холодном катоде, поверхность которого покрыта оксидной пленкой, сопровождается интенсивным перемещением катодных пятен в пределах границы газового ореола [7–9]. При этом взаимное расположение катодных пятен периодически изменяется от сосредоточенного до рассеянного даже при минимальном токе.

Как только начинается плавление поверхности катода на локальном участке, катодные пятна располагаются преимущественно у границы раздела твердой и жидкой фаз металла [7]. Изменение характера расположения и перемещения пятен в этом случае обусловлено уменьшением толщины поверхностной оксидной пленки у границы раздела фаз и, следовательно, уменьшением энергии связи ее с металлом подложки, что является причиной снижения порогового тока дуги. С увеличением тока дуги обратной полярности происходит вытеснение части катодных пятен с границы раздела фаз на поверхность с более толстой оксидной пленкой. В результате увеличивается зона катодного распыления и, следовательно, дуга обратной полярности в большей степени подвергается отклонениям от оси вольфрамового электрода.

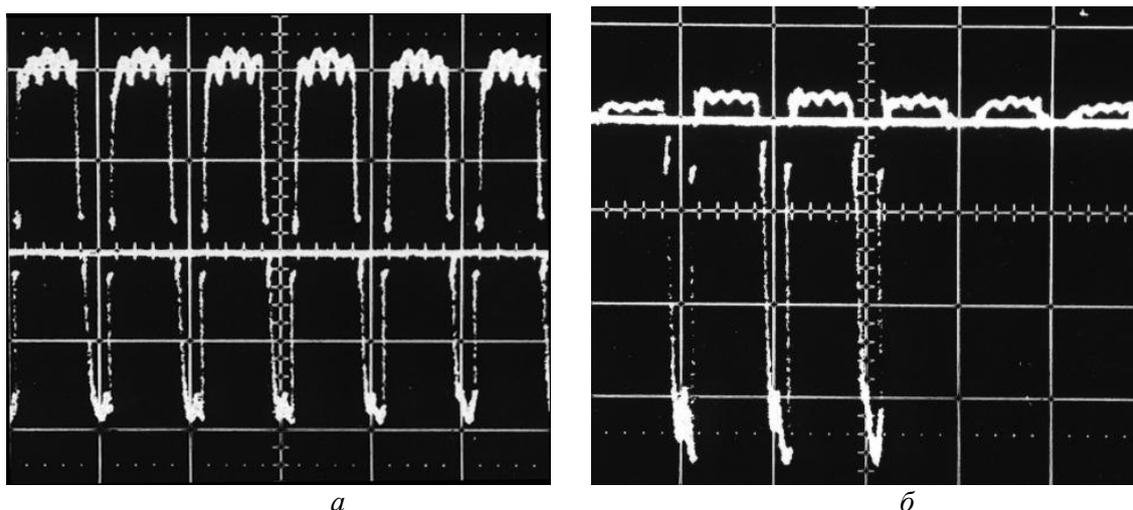
Отклонение при повторном возбуждении дуги прямой полярности в сторону предыдущего сосредоточения катодных пятен связано с остаточными явлениями в межэлектродном промежутке и на поверхности электродов при нулевом значении тока. Известно, что после по-

гасания дуги на исчезновение испарений с электродов в местах бывшего расположения активных пятен, а также заряженных частиц в межэлектродном промежутке требуется конечное время [10]. Учитывая, что экспериментальная установка обеспечивает очень малую длительность бестоковой паузы при смене полярности с обратной на прямую, эти явления проявляются в большей степени. Кроме того, на отклонение дуги прямой полярности оказывает влияние характер распределения температуры газовой среды, в которой дуга возбуждается и горит в течение соответствующего периода.

В частности, О.Я. Новиков [11] показал, что при дополнительном нагреве зона проводимости электрической дуги перемещается в направлении источника нагрева. Из этого следует, что зона проводимости дуги обратной полярности, имеющая максимальную температуру по отношению к окружающей среде, в случае характерного отклонения дуги от оси вольфрамового электрода и мгновенной смены полярности тока может рассматриваться как дополнительный внешний источник нагрева для дуги прямой полярности. Дополнительный подогрев способствует асимметрии проводимости дуги и соответствующему перераспределению линий тока [12]. Плавный характер изменения пространственного положения дуги прямой полярности и анодного пятна связан с тепловой инерцией пятна [13] и газа в межэлектродном промежутке.

Представленные выше результаты эксперимента подтверждают ранее выдвинутое предположение о том, что основным параметром режима сварки алюминиевых сплавов вольфрамовым электродом, определяющим пространственную устойчивость дуги переменного прямоугольного тока, является величина тока в сварочной цепи на завершающем этапе горения дуги обратной полярности. С учетом этой зависимости можно разрешить противоречие между требованиями, предъявляемыми к режиму сварки с точки зрения качественной очистки поверхности изделия от оксидной пленки и повышения пространственной устойчивости дуги. Для этого необходимо принудительно ограничивать величину тока в сварочной цепи до минимального значения непосредственно перед сменой полярности с обратной на прямую.

Такой вывод подтверждается результатами дополнительного эксперимента с использованием секционированного изделия. Из осциллограмм на рис. 4 следует, что, несмотря на относительно большое действующее значение тока в период горения дуги обратной полярности (30...32 А) и интенсивное блуждание катодных пятен (рис. 4, б), принудительное ограничение тока перед сменой полярности до уровня 5 А уменьшает отклонение дуги прямой полярности от оси вольфрамового электрода.



**Рис. 4.** Осциллограммы тока в сварочной цепи и в цепи боковых пластин секционированного изделия: а) ток в сварочной цепи ( $\mu_t = 17,8$  А/дел); б) ток в цепи боковых пластин ( $\mu_t = 8,9$  А/дел);  $\mu_t = 0,02$  с/дел

### Выводы

1. Увеличение тока обратной полярности до 10 А и более способствует расширению зоны перемещения катодных пятен и, следовательно, большему отклонению дуги от оси вольфрамового электрода.
2. В начальный период горения дуги прямой полярности расположение её в пространстве совпадает с предыдущим расположением дуги обратной полярности и связано с остаточными явлениями в межэлектродном промежутке и на поверхности электродов при нулевом значении тока.
3. Экспериментально установлено, что при сварке алюминиевых сплавов в широком диапазоне действующих значений переменного прямоугольного тока пространственное положение дуги в период протекания тока прямой полярности занимает практически соосное вольфрамовому электроду положение в случае кратковременного ограничения тока дуги обратной полярности до уровня 5 А на завершающем этапе её горения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. Б.Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.
2. Ковалев И.М., Акулов А.И., Мартинсон Л.К. О некоторых закономерностях в течениях дуговых плазменных потоков // Физика и химия обработки материалов. – 1972. – № 2. – С. 9–14.
3. Электрическая дуга при сварке / ВЦП. – 1986. – № М-04340. – 91 с. – Пер. ст.: The electric arc in welding // The Physics of Welding. Oxford: International Institute of Welding, 1984. – P. 134–203.
4. Киселев А.С. Исследование пространственной устойчивости дуги переменного тока с прямоугольной формой волны: тез. докл. I Научно-практической конференции сварщиков Средней Азии и Казахстана. – Караганда, 1991. – С. 12–13.
5. Короткова Г.М., Славин Г.А., Филиппов М.А. Исследование процесса сварки дугой переменного тока прямоугольной формы // Сварочное производство. – 1971. – № 10. – С. 4–6.
6. Дуговая сварка на переменном токе алюминиевых сплавов вольфрамовым электродом в среде инертного газа // Информэлектро. – 1986. – № 51102. – С. 16. – Пер. ст.: Maruo H., Hirata Y. Rectangular wave AC TIG welding of aluminium alloy // International Institute of Welding. Document. – 1986. – № 212-647-86. – P. 1–10.
7. Кесаев И.Г. Катодные процессы электрической дуги. – М.: Наука, 1968. – 244 с.
8. Гвоздецкий В.С., Рублевский И.Н., Яринич Л.М. Преддуговые процессы на холодных катодах со слабоионизированным разрядным промежутком // Автоматическая сварка. – 1977. – № 10. – С. 17–22.
9. Столбов В.И. Исследование формы сварочной дуги // Автоматическая сварка. – 1979. – № 2. – С. 15–17, 22.
10. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. – М.: Машиностроение, 1970. – 335 с.
11. Новиков О.Я. Устойчивость электрической дуги. – Л.: Энергия, 1978. – 156 с.
12. Тиходеев Г.М. Энергетические свойства электрической сварочной дуги. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1961. – 254 с.
13. Ковалев И.М. Пространственная устойчивость движущейся дуги с неплавящимся катодом // Сварочное производство. – 1972. – № 8. – С. 1–3.

Поступила 02.10.2013 г.