

ВОПРОСЫ СВАРКИ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ

УДК 621.791

DOI: 10.35211/1990-5297-2024-2-285-60-64

А. В. Савинов, О. А. Полесский, В. И. Лысак, А. А. Чудин, П. П. Красиков, Д. А. Муругов

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДУГИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: svarka-nv@vstu.ru

В работе приведены результаты исследований влияния параметров дуги переменного тока с неплавящимся электродом на ее вольт-амперные характеристики. Показано, что с ростом длительности импульсов обратной полярности $\tau_{обр}$ напряжение на прямой полярности монотонно уменьшается, приближаясь к значению 3 ... 4,5 В, когда $\tau_{обр}$ составляет преобладающую часть периода.

Ключевые слова: дуга переменного тока, неплавящийся электрод, статическая характеристика.

A. V. Savinov, O. A. Polesskiy, V. I. Lysak, A. A. Chudin, P. P. Krasikov, D. A. Murugov

STATIC CHARACTERISTICS OF THE ALTERNATING CURRENT ARC WITH NON-CONSUMABLE ELECTRODE

Volgograd State Technical University

The paper presents the results of studies of the influence of the parameters of an alternating current arc with a non-consumable electrode on its current-voltage characteristics. It is shown that with increasing duration of pulses of reverse polarity τ_{rev} , the voltage on the direct polarity decreases monotonically, approaching a value of 3 ... 4.5 V, when τ_{rev} makes up the predominant part of the period.

Keywords: alternating current arc, non-consumable electrode, static characteristic.

Алюминиевые сплавы по объемам применения в качестве конструкционных материалов занимают второе место после сплавов на основе железа, причем область их использования неуклонно расширяется. Это объясняется как доступностью этих материалов, так и уникальным комплексом свойств (низкая плотность, относительно высокая прочность, высокая коррозионная стойкость), обуславливающим предпочтительное применения алюминиевых сплавов в аэрокосмической технике, судостроении, химическом машиностроении, строительстве и т.д. [1, 2, 3].

Специфические свойства алюминия, обусловившие широкое распространение его сплавов в качестве конструкционных материалов, в значительной мере определяют и проблемы их сварки. Легкая окисляемость алюминия в твердом и расплавленном состоянии обуславливает существенные затруднения при сварке,

поскольку образующаяся тугоплавкая пленка окиси алюминия препятствует формированию шва и служит источником неметаллических включений в металле шва. Для удаления оксидной пленки сварка производится на переменном токе с прямоугольной формой импульсов (ПФИ) [4].

Дуга ПФИ, помимо обычных параметров, характеризующих режим горения дуги (ток и напряжение), имеет специфические параметры: соотношение длительностей импульсов прямой $\tau_{пр}$ и обратной $\tau_{обр}$ полярностей (или, при заданной частоте, длительность импульса любой полярности, например, $\tau_{обр}$), амплитуда токов в импульсах прямой $I_{д пр}$ и обратной $I_{д обр}$ полярностей и частота тока f .

Если пренебречь незначительными изменениями величин тока и напряжения в течение импульсов прямой и обратной полярностей, которые обусловлены пульсацией выходного на

пряжения источника питания, можно считать параметры дуги ПФИ постоянными. Этот вывод позволяет отнести процесс горения дуги в течение импульса к стационарным разрядам, в то время как дугу переменного синусоидального тока к такому типу разрядов причислить нельзя [5]. Разумеется, дуга ПФИ может с полным основанием считаться стационарной только относительно каждого отдельного импульса, когда «основные свойства ее не зависят от времени, а ток разряда является постоянным» [6] (в работе [7] такая дуга названа квазистационарной). Такой подход позволяет в необходимых случаях представлять дугу ПФИ как совокупность дуговых разрядов постоянного тока прямой и обратной полярности, каждый из которых можно считать стационарным.

С учетом изложенных представлений, возможны два варианта графического выражения характеристик дуги ПФИ. Первый из них предполагает построение двух ВАХ (для одной величины дугового промежутка): одну – для импульсов обратной полярности, вторую – для импульсов прямой полярности. Фактически первая из них является вольтамперной характеристикой дуги постоянного тока обратной полярности, вторая – прямой полярности. Такой подход вполне правомерен, т. к. величина тока в течение импульса остается практически неизменной из-за высокой крутизны падения ВАХ источника питания, а длительность импульсов $\tau_{пр}$ и $\tau_{обр}$ многократно превышает время установления дугового разряда [7].

Второй вариант предполагает построение ВАХ, в которой функцией служит действующее значение напряжения. В общем случае его величина определяется выражением [6]:

$$U_d = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_d^2(t) dt}, \quad (1)$$

где u_d – мгновенное значение напряжения.

Принимая значения напряжений в течение импульсов прямой и обратной полярностей постоянными, выражение (1) можно преобразовать следующим образом:

$$U_d = \sqrt{\frac{1}{T} (U_{д пр}^2 \tau_{пр} + U_{д обр}^2 \tau_{обр})}. \quad (2)$$

Строго говоря, только второй вариант обеспечивает получение вольтамперных характеристик дуги ПФИ, поскольку, как уже отмечалось выше, построенные по первому варианту ВАХ фактически являются характеристиками дуги постоянного тока прямой и обратной полярностей. Однако для изучения дуговых процессов необходим анализ зависимостей от тока дуги, как действующего значения ее напряжения, так и фактических значений его в импульсах прямой и обратной полярностей.

Построенные по обоим вариантам ВАХ дуги представлены на рис. 1. В обоих случаях частота переменного тока 50 Гц, диаметр электрода 3 мм, длительность импульса обратной полярности $\tau_{обр}$ составляла 1,25 мс, т. е. 0,06T (рис. 1, а) и 6,25 мс, т. е. 0,3T (рис. 1, б). Следует иметь в виду, что величины $U_{д пр}$ и $U_{д обр}$ противоположны по знаку, хотя на рис. 1 они показаны однозначными для удобства анализа.

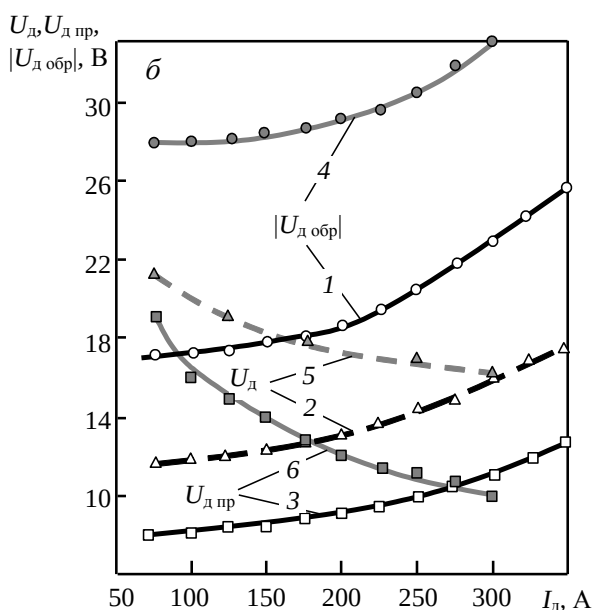
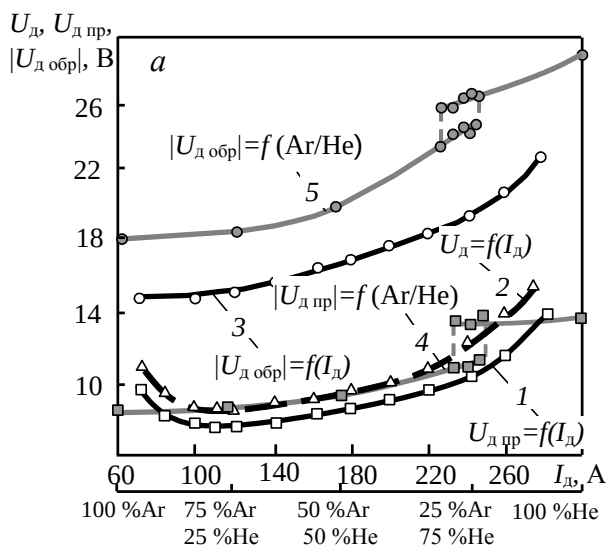


Рис. 1. Вольтамперные характеристики дуги ПФИ:
 $f = 50$ Гц; $\tau_{обр} = 1,25$ мс, 1 ... 3 – аргон, 4, 5 – $I_d = 180$ А (а); $f = 50$ Гц; $\tau_{обр} = 6,25$ мс, 1 ... 3 – в аргоне, 4 ... 6 – в гелии (б)

Как следует из результатов опытов, характеристики $U_d = f(I_d)$, $U_{d\text{ пр}} = f(I_d)$, $U_{d\text{ обр}} = f(I_d)$ имеют возрастающий характер. Исключение составляют две первые из характеристик на рис. 1, а, имеющие падающий и жесткий участки в диапазоне токов 70 ... 120 А. Возможно, в этом диапазоне с ростом тока увеличивается разогрев вольфрамового электрода и, как следствие, уменьшается катодное падение напряжения в импульсах прямой полярности.

Более высокая скорость нарастания напряжения при токах свыше 200 А объясняется, по-видимому, увеличивающимся (с ростом тока) заглублением дуги в алюминиевую пластину и, как следствие, ее удлинением. Известно, что с увеличением длины дуги ее вольтамперная характеристика смещается в сторону больших напряжений. Следовательно, кривые на рис. 1, строго говоря, являются вольтамперными характеристиками только в диапазоне токов, не превышающих 200 А, когда заглубление дуги в металл отсутствует или мало; при больших токах они представляют собой траектории перехода с одних ВАХ на другие, соответствующие большим длинам дуги. Поскольку такое заглубление дуги при сварке неизбежно, поправки для получения физически точных ВАХ не вносились.

Исследование влияния соотношения компонентов аргоно-гелиевой смеси на напряжение горения дуги выявило наличие при концентрации гелия 70 ... 80 % скачкообразного роста падения потенциала не только в импульсах тока прямой полярности, но и в импульсах обратной полярности.

Сравнение данных рис. 1, а и 1, б свидетельствует, что при увеличении $\tau_{\text{обр}}$ зависимость $U_d = f(I_d)$ смещается в сторону больших напряжений, причем у дуги в гелии зависимости $U_{d\text{ пр}} = f(I_d)$ и $U_d = f(I_d)$ носят падающий характер во всем исследуемом диапазоне токов. Исследование причин такого влияния показало, что длительность импульса обратной полярности $\tau_{\text{обр}}$ воздействует не только на величину действующего значения напряжения U_d , но и на величины $U_{d\text{ пр}}$ и $U_{d\text{ обр}}$. Зависимости $U_d = f(\tau_{\text{обр}})$, $U_{d\text{ пр}} = f(\tau_{\text{обр}})$, $|U_{d\text{ обр}}| = f(\tau_{\text{обр}})$ представлены на рис. 2. Как видно, напряжение U_d с ростом $\tau_{\text{обр}}$ сначала снижается (при этом уменьшается и мощность дуги), а затем начинает расти, приближаясь по величине к $U_{d\text{ обр}}$. Напряжение $U_{d\text{ обр}}$ при сравнительно малых токах сначала увеличивается (с ростом $\tau_{\text{обр}}$), а затем остается неизменным (рис. 2, а). При токах дуги свыше

100 А (рис. 2, б) $U_{d\text{ обр}}$ практически постоянно возрастает во всем диапазоне изменений $\tau_{\text{обр}}$. Интегральное напряжение горения дуги в гелии меньше зависит от $\tau_{\text{обр}}$, чем в аргоне, что обусловлено подавляющим влиянием высокого напряжения в импульсах обратной полярности (28–30 В).

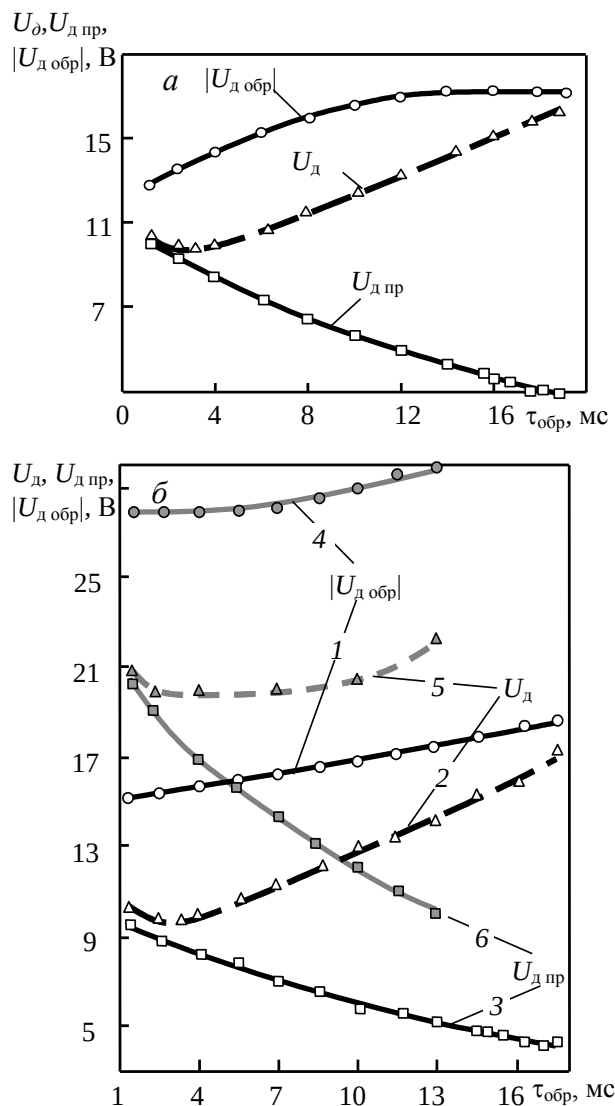


Рис. 2. Влияние длительности импульса обратной полярности $\tau_{\text{обр}}$ на напряжение дуги ПФИ:
 $I_d = 50$ А, аргон (а); $I_d = 100$ А 1...3 – в аргоне,
 4...6 – в гелии (б); $f = 50$ Гц

Особый интерес представляет зависимость $U_{d\text{ пр}} = f(\tau_{\text{обр}})$ в аргоне. С ростом $\tau_{\text{обр}}$ напряжение импульса прямой полярности $U_{d\text{ пр}}$ монотонно уменьшается, приближаясь к значению 3 ... 4,5 В, когда $\tau_{\text{обр}}$ составляет преобладающую часть периода (рис. 2). Еще более интенсивно падает напряжение $U_{d\text{ пр}}$ у дуги в гелии, не достигая, однако, столь низких значений.

Уменьшение $U_{д пр}$ с ростом $\tau_{обр}$ обусловлено ростом температуры рабочего участка вольфрамового электрода, увеличением плотности тока термоэмиссии и, в результате, уменьшением падения напряжения на катодной области в импульсах прямой полярности. Однако только этим обстоятельством вряд ли можно объяснить такое аномально низкое значение напряжения на дуге. Возможно, сказывается также состояние плазмы у поверхности рабочего участка электрода, сжатие которой в импульсах обратной полярности обеспечивает высокую проводимость в прикатодной зоне при возбуждении дуги прямой полярности.

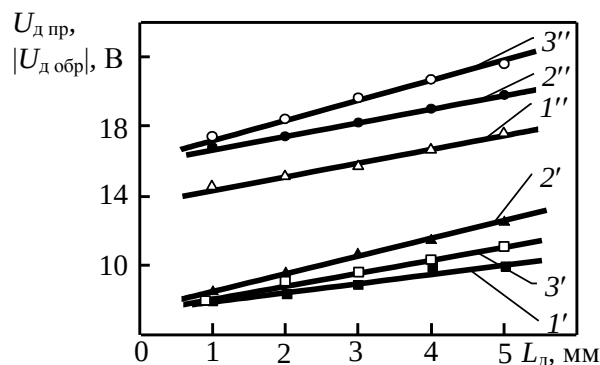
В общем случае зависимость $U_{д} = f(L_{д})$ выражается уравнением прямой $U_{д} = a + bL_{д}$ [8].

Для дуги ПФИ:

$$U_{д пр} = a' + b'L_{д}; \quad (3)$$

$$U_{д обр} = a'' + b''L_{д}. \quad (4)$$

Экстраполяция прямых 1', 2', 3', 1'', 2'', 3'' (рис. 3) до $L_{д} = 0$ позволяет ориентировочно оценить величины a' и a'' в уравнениях (3, 4). Поскольку коэффициенты b' и b'' в этих уравнениях есть тангенс угла наклона соответствующих прямых к оси $L_{д}$, их значения легко рассчитываются. Результаты расчетов сведены в таблицу (см. рис. 3), анализ которой показывает, что в импульсах постоянного тока прямой и обратной полярности [9, 10] зависимости $U_{д пр} = f(L_{д})$ и $U_{д обр} = f(L_{д})$ близки к прямым линиям. При увеличении длительности обратного импульса $\tau_{обр}$ и неизменной частоте зависимости $U_{д пр} = f(L_{д})$ смещается в сторону меньших напряжений, а зависимость $U_{д обр} = f(L_{д})$ – наоборот, в сторону больших напряжений.



Значения коэффициен- тов	Номера прямых					
	1'	2'	3'	1''	2''	3''
	Прямая по- лярность			Обратная поляр- ность		
$a' = U_{к'} + U_{а'}$, В	7,5	7,6	7,4	—	—	—
$a'' = U_{к''} + U_{а''}$, В	—	—	—	13,4	15,5	16,4
$b' = E_{с'}$, В/мм	0,5	1,0	0,75	—	—	—
$b'' = E_{с''}$, В/мм	—	—	—	0,75	0,875	1,0

Рис. 3. Зависимость напряжения в импульсах прямой $U_{д пр}$ и обратной $U_{д обр}$ полярностей от длины дуги $L_{д}$: ток дуги 100 А (1', 1'') и 250 А (2', 2'', 3', 3''), $\tau_{обр} = 3,75$ мс (1', 1'', 2', 2'') и 7,5 мс (3', 3''), $f = 50$ Гц

Сумма катодного и анодного падений напряжения мало зависит от тока дуги и длительности обратного импульса; в то же время, a' в импульсах прямой полярности на 6 .. 9 В меньше, чем a'' в импульсах обратной полярности. Если полагать, что анодное падение $U_{а пр}$ и $U_{а обр}$ практически неизменно (что не противоречит литературным данным [7, 10]), то можно сделать вывод о том, что в дуге ПФИ

катодное падение напряжения в импульсах обратной полярности на 6 .. 9 В больше, чем в импульсах прямой полярности.

Что касается напряженности электрического столба дуги $E_{с}$, то его величина мало зависит от полярности импульсов, а, следовательно, столь же мало зависит от полярности импульсов и мощность, выделяющаяся в столбе дуги ПФИ [4].

Выводы

1. Исследование влияния соотношения компонентов аргоно-гелиевой смеси на напряжение горения дуги выявило наличие при концентрации гелия 70 ... 80 % скачкообразного роста падения потенциала как в импульсах тока прямой, так и обратной полярности.

2. С ростом $\tau_{\text{обр}}$ напряжение импульса прямой полярности $U_{\text{д пр}}$ монотонно уменьшается, приближаясь к значению 3 ... 4,5 В, когда $\tau_{\text{обр}}$ составляет преобладающую часть периода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гуревич, С. М.* Справочник по сварке цветных металлов / С. М. Гуревич. – Киев : Наукова думка, 1981. – 608 с.
2. *Рабкин, Д. М.* Сварка алюминия и его сплавов / Д. М. Рабкин, В. Г. Игнатьев, И. В. Довбищенко. – Киев : Наукова думка, 1983. – 80 с.

3. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. Б. Е. Патона. – М. : Машиностроение, 1974. – 768 с.

4. *Савинов, А. В.* Дуговая сварка неплавящимся электродом / А. В. Савинов, И. Е. Лапин, В. И. Лысак. – М. : Машиностроение, 2011. – 477 с.

5. *Рабинович, И. Я.* Оборудование для дуговой электрической сварки / И. Я. Рабинович. – М. : Машгиз, 1968. – 380 с.

6. *Лебедев, В. К.* Тенденции развития источников питания для дуговой сварки / В. К. Лебедев, И. И. Заруба, А. А. Пентегов // Автоматическая сварка. – 1982. – № 7. – С. 29–35.

7. *Лесков, Г. И.* Электрическая сварочная дуга / Г. И. Лесков. – М. : Машиностроение, 1970. – 335 с.

8. *Зимин, А. М.* О взаимосвязи катодных процессов электрических дуг / А. М. Зимин, Н. П. Козлов, В. И. Хвесьюк // ЖТФ. – 1973. – № 6. – С. 1248–1254.

9. *Тиходеев, Г. М.* Энергетические свойства электро-сварочной дуги / Г. М. Тиходеев. – М. : Изд-во АН СССР, 1961. – 254 с.

10. Теоретические основы сварки / под. ред. В. В. Фролова. – М. : Высшая школа, 1970. – 592 с.