

Сидоров В.П., Советкин Д.Э., Короткова Г.М. О допустимых токах на вольфрамовый электрод дуги с разнополярными импульсами тока // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 5–12. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.4.01

Sidorov V.P., Sovetkin D.E., G.M. Korotkova Admissible currents to tungsten arc electrode with multipolar current pulses. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 5–12. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.4.01

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 22, № 4, 2020

Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2020.4.01
УДК 621.791.75

В.П. Сидоров, Д.Э. Советкин, Г.М. Короткова

Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия

О ДОПУСТИМЫХ ТОКАХ НА ВОЛЬФРАМОВЫЙ ЭЛЕКТРОД ДУГИ
С РАЗНОПОЛЯРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ТОКА

Проведен анализ работ по допустимым токам на вольфрамовые электроды при дуговой сварке. Информация по этому вопросу носит противоречивый и несистемный характер. Обоснована необходимость решения задачи по расчету допустимых токов на вольфрамовый электрод в аргоновой дуге с разнополярными импульсами тока. Для этого использованы экспериментальные данные по допустимым токам дуг прямой и обратной полярностей и синусоидальному переменному току, по которым проведен анализ по разработанной методике. Показано, что сравнение допустимых токов дуги переменного тока синусоидальной формы с токами дуг постоянного тока следует проводить по их среднему значению. Зависимости средних рекомендованных значений плотности тока от диаметра электрода для всех полярностей хорошо описываются гиперболической функцией. Получены аппроксимирующие коэффициенты зависимости для трех видов полярности. Предположено, что данные о допустимых токах в однофазной дуге могут быть завышены из-за наличия постоянной составляющей.

Установлено, что при увеличении диаметра электрода отношение допустимых токов на прямой и обратной полярностях дуги возрастает линейно, и получены коэффициенты такой зависимости. Эта зависимость положена в основу расчетной методики определения допустимых токов на электрод при сварке с РПИ в зависимости от его диаметра и баланса полярностей. Произведено сравнение расчетной методики с экспериментальными данными и получена их удовлетворительная сходимость. Допустимые токи на электрод в дуге с РПИ резко уменьшаются при увеличении доли обратной полярности свыше 30 %, однако такой баланс обеспечивает качественное разрушение окисной пленки при сварке алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: дуга в аргоне, вольфрамовый электрод, полярность, алюминий, катодное распыление, разнополярные импульсы, баланс токов, допустимый ток, плотность тока, гиперболическая зависимость, методика расчета.

V.P. Sidorov, D.E. Sovetkin, G.M. Korotkova

Togliatti State University, Tolyatti, Russian Federation

ADMISSIBLE CURRENTS TO TUNGSTEN ARC ELECTRODE
WITH MULTIPOLAR CURRENT PULSES

This article analysis works on permissible currents for tungsten electrodes at arc welding. Information on this issue is contradictory and non-systemic. The necessity of solving the problem about the calculation of permissible currents to a tungsten electrode in argon arc with bipolar current pulses has been substantiated. For this, we used experimental data on permissible currents of direct and reverse polarity arcs, and a sinusoidal alternating current, which was analyzed according to the developed procedure. It is shown that permissible currents of sinusoidal alternating current arc and direct current arc shall be compared according to its average value. Dependencies of the average value of recommended current densities on electrode diameter regarding all polarities are well described by a hyperbolic function. We obtained approximation dependence coefficients for three polarity types. It is supposed that data on permissible currents in a single-phase arc may be overestimated due to a constant component.

It was found that when increasing the electrode diameter, the ratio of permissible currents on the direct and reverse polarity arc increases linearly, so the coefficients of this dependence are obtained. This dependence is used as the basis for the calculation method for determining permissible currents to the electrode when welding with bipolar current pulses depending on its diameter and polarity balance. The calculation method is compared with experimental data, and their satisfactory convergence is obtained. Permissible currents to the electrode in the arc with bipolar current pulses decrease sharply with an increase in the proportion of reverse polarity over 30 %. However, such a balance ensures qualitative oxide film destruction when welding aluminum alloys.

Keywords: arc in argon, tungsten electrode, polarity, aluminum, cathode sputtering, bipolar pulses, current balance, permissible current, current density, hyperbolic dependence, calculation method.

Введение

В настоящее время для дуговой сварки алюминиевых сплавов неплавящимся электродом используются установки с разнополярными импульсами тока прямоугольной формы (РПИ) [1]. В основном они служат для сварки свободной дугой, иногда такую разновидность дуги применяют для плазменной сварки [2] или для сварки плавящимся электродом под слоем флюса [3], что обусловлено рядом технологических преимуществ дуг с РПИ. Большинство недорогих установок¹ позволяют регулировать только соотношение длительностей протекания полярностей, но имеются и установки, в которых регулируют значение импульсов тока и их частоту [3]. Рекомендации по выбору токов импульсов при сварке неплавящимся электродом с РПИ в инструкциях на оборудование обычно не приводятся².

Известно, что допустимые токи на вольфрамовые электроды в зависимости от полярности дуги отличаются в несколько раз, причем максимальные токи присущи дуге прямой полярности [4], которая в зарубежной литературе обозначается EN. При сварке дугой переменного тока, в том числе в дуге с РПИ, используется комбинация полярностей. Допустимые токи и стойкость электрода промежуточны между показателями для дуг прямой и обратной полярностей (обозначается EP).

Одним из важных требований к дуге с РПИ при сварке алюминиевых сплавов является такой выбор длительности протекания и силы тока на обратной полярности, чтобы обеспечивалось катодное разрушение окисной пленки алюминия. По данным работы [1], для свободной дуги доля длительности обратной полярности должна составлять $\varphi > 0,2$. Для сжатой дуги фактическое использование φ также близко к этому значению [2]. От соотношения длительности полярностей в дуге с РПИ в определенной степени зависит и ее проплавляющая способность [4, 5]. Для сжатой дуги изменение соотношения длительности полярностей может косвенно влиять на предельное давление плазменной струи посредством роста критических токов аварийного режима двойного дугообразования, которые, по данным работы [6], выше при нестационарной токовой нагрузке. Таким образом, при значении тока на неплавящийся электрод в дуге

с РПИ необходимо сбалансировать три фактора: стойкость неплавящегося электрода, разрушение окисной пленки алюминия и необходимую степень проплавления изделия. В свою очередь, степень проплавления изделия зависит от соотношения полярностей и давления дуги. Выбору токов на неплавящиеся электроды в свободной дуге с РПИ посвящена работа [7].

При использовании переменного тока торец электрода оплавляется полностью и приобретает каплеобразную форму. Это, по мнению автора работы [7], является необходимым условием пространственной устойчивости свободной дуги переменного тока. Минимальный ток, обеспечивающий появление капли, является одним из условий сварки на переменном токе. При увеличении тока капля растет и достигает удвоенного размера по сравнению с начальным, после чего может оторваться от электрода. Автор работы [7] придерживается мнения, что ответа на вопрос, какие электроды лучше использовать для сварки на переменном токе: активированные или из чистого вольфрама, нет. При горении дуги с РПИ с частотой 50 Гц разницы в допустимых токах на электроды с присадками и без присадок не отмечено, если длительность тока обратной полярности достаточно велика. По графикам, приведенным в работе [7], можно заметить, что в такой области допустимые токи с увеличением диаметра подчиняются зависимости, напоминающей гиперболу. При уменьшении времени протекания тока обратной полярности τ_0 до $\leq 2,5$ мс допустимые токи такие же, как в дуге прямой полярности. В работе [7] это объяснено тем, что за время протекания тока прямой полярности электрод успевает отдать избыточную энергию, накопленную в период обратной полярности. С учетом значительно большей инерционности отвода тепла в электроде по сравнению с электрическими процессами при частоте 50 Гц данное объяснение представляется спорным.

В работе [7] описаны эксперименты, в которых при постоянном τ_0 изменяли длительность τ_{II} . По-видимому, для этого использовался источник питания с регулированием частоты импульсов, однако указаний на это в работе [7] нет. Допустимые токи возрастают с небольшим уменьшением интенсивности почти пропорционально длительности импульса прямой полярности. С определенного τ_{II} дальнейшее его увеличение не дает приращения допустимого тока. В результате обработки экспериментальных данных в работе [7] предложены эмпирические формулы для значений критического тока в зависимости от длительности протекания тока двух полярностей.

¹ Руководство по эксплуатации инверторного аппарата (TIG). СПб., 2011. 14 с.

BRIMA Welding International. Установка аргонодуговой сварки универсальная, инверторная TIG-315 AC/DC. Паспорт и руководство по эксплуатации. 2005. 21 с.

² Там же.

В работе [8] указаны две причины потери работоспособности вольфрамовых электродов на прямой полярности дуги – локальный перегрев электрода и эрозия и снижение эмиссионных свойств его рабочего участка. Исследовали электроды марки ВЛ-10. Локальный перегрев во многом зависит от вылета электрода, на что в ряде выполненных ранее исследований не обращалось внимания. За критерий минимальной работоспособности электрода авторы работы [8] выбрали его работу без разрушения в течение 20 мин, которая происходила на расстоянии 9–16 мм от края закрепления электрода в держателе горелки при вылете 25 мм. Допустимые токи практически не зависели от угла заточки электродов и оказались намного больше рекомендуемых в литературе. Авторами получена эмпирическая формула линейной зависимости роста допустимого тока от увеличения диаметра электрода.

В работе [9] исследовалась стойкость электродов диаметром 3,2 мм марки WS-2 фирмы Witstar при точечной сварке сталей сжатой дуги прямой полярности. Сварка велась на токе примерно 320 А в течение 0,9 с, число таких циклов около 500, т.е. общее время сварки примерно 7,5 мин. Цикл сварки одной точки включал три импульса: два обычных и в середине высокочастотный (250 Гц) в течение 0,4 с. В качестве плазмообразующего аргона использовалась смесь «Варигон» из 95 % аргона и 5 % водорода. При выполнении большого числа сварных точек на конце конического участка образуется «венчик». Используемый ток более чем в 2 раза превышал токи для электродов из чистого вольфрама, по данным работы [10].

В работе [11] исследовался вид рабочей поверхности вольфрамовых электродов марки WT-20 на переменном синусоидальном и разнополярном токах свободной дуги при сварке алюминиевого сплава от сварочного аппарата Matrix 200 DC/AC. В аппарате реализовано зажигание дуги при напряжении обратной полярности. В этом случае, как полагают разработчики аппарата, зажигание дуги протекает легче вследствие повышенных эмиссионных свойств окисной пленки алюминия. Процесс зажигания программируется в зависимости от диаметра электрода и вида переменного тока. Результаты исследований [11] сведены нами в табл. 1. Рабочий ток дуги во всех опытах составлял 90 А. Продолжительность горения рабочей дуги 16–17 с. Тем не менее рабочий конец электрода оплавлялся по-разному.

При диаметре установленного в горелку торированного электрода $d = 1,6$ мм, при заданном в программе диаметре $d_3 = 1,0$ мм, начальное зажигание дуги производилось на токе обратной поляр-

ности $I_{EP} = 50$ А длительностью 64 мс. В результате электрод неравномерно оплавился, следы подготовленной конической поверхности отсутствовали. На аналогичном режиме синусоидального тока, когда $d_3 = d_p = 1,6$ мм, зажигание осуществлялось на $I_0 = 80$ А и длилось 104 мс. На рабочем конце электрода образовалась полусферическая поверхность с диаметром, примерно равным диаметру электрода. Таким образом, можно предположить, что в программе установки предусмотрено увеличение тока зажигания с увеличением диаметра электрода.

Это подтверждается тем, что при увеличении $d_3 = 2,4$ мм, при $d = 1,6$ мм, ток зажигания был увеличен до 100 А, а продолжительность зажигания возросла до 140 мс. В результате на конце электрода образовалась деформированная сферическая поверхность размером существенно больше диаметра электрода. Поскольку режим основной дуги не изменился, избыточное расплавление торца электрода следует отнести к воздействию дуги зажигания обратной полярности. При синусоидальном токе различие в заданном и реальном диаметрах электрода приводит к тому, что стойкость электрода не обеспечивается. Аналогичная зависимость имеет место и для разнополярных импульсов.

Таблица 1

Параметры зажигания дуги переменного тока

I_{EP}, A	$t_{EP}, мс$	$d, мм$	$d_3, мм$	Основной ток 90 А	Стойкость
50	64	1,0	1,6	Синусоидальный	(–)
80	104	1,6	1,6	Синусоидальный	(+)
100	140	2,4	1,6	Синусоидальный	(–)
50	64	1,0	1,6	РПИ: EN 85 % EP 15 % 50 Гц	(+)
80	104	1,6	1,6	РПИ: EN 85 % EP 15 % 50 Гц	(+)
100	140	1,6	2,4	РПИ: EN 85 % EP 15 % 50 Гц	(–)
100	140	1,6	2,4	РПИ: EN 50 % EP 50 % 50 Гц	(–)
100	140	1,6	2,4	РПИ: EN 85 % EP 15 % 150 Гц	(–)

В работе [12] представлены фотографии вольфрамового электрода при длительности импульсов обратной полярности от 10 до 50 % периода. Ток импульсов составлял 110 А, а длительность горения дуги 110 с. Уже при 20 % длительности обратной полярности на притупленном конце электрода имелись выступы, а при 30 % наблюдалась значительная эрозия электрода.

В работе [10] приведены допустимые токовые нагрузки на вольфрамовые электроды для дуг в аргоне и гелии на прямой, обратной полярностях и переменном токе. В работе [13] выполнен обзор

качественных характеристик преимущественно современных зарубежных электродов, в основном по сведениям из сети Интернет, и даны рекомендации по выбору марки для различных способов сварки. Однако рекомендаций по выбору токов в этой работе нет. В работе [14] исследовалась мощность, передаваемая в специальный неплавящийся электрод плазматрона на обратной полярности дуги в аргоне. Установлено, что удельная эффективная мощность в анод плазматрона не зависит от тока и расхода плазмообразующего аргона и составляет 6 Вт/А.

Проведенный обзор показывает, что данные о допустимых токах и стойкости неплавящихся электродов немногочисленны и противоречивы. В связи с этим разработка расчетной методики выбора тока на неплавящийся электрод при сварке РПИ представляется актуальной.

Методика исследований

Анализировали данные по допустимым токам на неплавящиеся электроды из работы [10] для аргоновой дуги. Для этого рассчитывали средние рекомендуемые токи дуг I_C , размах относительных отклонений от них ΔI_C и сравнивали по видам полярностей (табл. 2).

Таблица 2

Допустимые токи (А) на электроды [10] и их анализ

Род тока	Диаметр электрода, мм			
	3	4	5	6
Переменный I_D	100–160	140–220	200–280	250–300
$\Delta I_D, \%$	±23	±22	±17	±9
I_{VC}	118	164	218	250
EN	140–180	250–340	300–400	350–450
$\Delta I_{EN}, \%$	±12,5	±15	±14	±12,5
I_{ENS}	172	253	346	451
EP	20–40	30–50	40–80	60–100
$\Delta I_{EP}, \%$	±33	±25	±33	±25
I_{EPS}	39	50	60	69
$R = I_{ENS}/I_{EPS}$	4,41	5,06	5,77	6,54
$(I_{ENS} + I_{EPS})/2$	105,5	151,5	203	260
$\mu = (I_{ENS} + I_{EPS})/(2I_{VC})$	0,887	0,929	0,967	1,0

Примечание: выделены строки с исходными данными.

При расчете мощности дуги переменного тока по действующему значению тока, которое измеряется приборами, необходимо использовать поправочный коэффициент μ , на что указано в работе [15], но значения такого коэффициента в данной работе не приводятся. В работе [16] показано, что мощность дуги переменного тока точнее оценивать не по действующему, а по среднему значению тока за период, если принять мгновенные значения на-

пряжения дуги не зависящими от тока. Среднее значение переменного тока $I_C = 0,64$ амплитудного, а действующее $0,707I_M$. Следовательно, теоретическое значение поправочного коэффициента $\mu = I_C/I_D = 0,91$. Исходя из этого, средние допустимые действующие значения переменного тока умножали на этот коэффициент и получали ток I_{VC} . Также была рассчитана полусумма средних допустимых токов прямой и обратной полярностей $(I_{ENS} + I_{EPS})/2$, которую сравнивали с I_{VC} . Полусумма $(I_{ENS} + I_{EPS})/2$, по нашему мнению, в значительной степени характеризует мощность, передаваемую электроду из приэлектродных областей в дуге переменного тока, так как при отсутствии постоянной составляющей тока время действия и токи полярностей одинаковы.

Зависимости допустимых токов на неплавящиеся электроды от диаметра можно уточнить, если использовать весь массив данных из табл. 2. Для этого аппроксимировали зависимости плотности тока от диаметра для каждой из полярностей из табл. 2 гиперболической функцией по методу наименьших квадратов с помощью компьютерной программы, приведенной в работе [17]. Для одного диаметра вводили два значения плотности тока (минимальное и максимальное), что позволило увеличить массив данных до восьми точек вместо четырех и выполнить аппроксимацию более точно. Для дуги переменного тока аппроксимацию выполняли по средним значениям тока за период. Гиперболическая функция имела вид

$$j = F + \left(\frac{K}{d} \right), \quad (1)$$

где d – диаметр электрода, мм; F, K – коэффициенты аппроксимации.

Полученные значения коэффициентов приведены в табл. 3, а расчетные зависимости – на рис. 1.

Таблица 3

Коэффициенты аппроксимации для формулы (1)

Полярность	$F, \text{А/мм}^2$	$K, \text{А/мм}$
EN	7,543	50,46
EP	0,692	18,72
Переменный ток	1,550	45,85

Результаты исследования и их обсуждение

Наиболее узкий относительный диапазон допустимых токов присущ дуге прямой полярности, и этот диапазон стабилен для всех диаметров электрода. Наибольший относительный диапазон токов

имеет место для дуги обратной полярности, что, по-видимому, связано с меньшей исследованностью такой разновидности дуги. Для дуги переменного тока допустимый относительный диапазон сужается с ростом диаметра электрода. Этому можно дать такое объяснение, что это связано с бóльшим применением на производстве электродов большего диаметра и установленными более точными значениями допустимых токов. Использование разных диаметров электродов на прямой полярности более равномерно.

В табл. 2 были приведены отношения средних допустимых токов прямой и обратной полярностей $R = I_{ENS}/I_{EPS}$ в зависимости от диаметра электрода. Эта зависимость монотонна, в ней R изменяется от 4,41 до 6,54. Среднее значение $R = I_{ENS}/I_{EPS} = 5,45$ при среднем относительном отклонении по абсолютной величине $CAO = 13\%$ [18].

Сравнение коэффициентов в формуле (1) для прямой полярности и переменного тока показывает, что коэффициент K отличается незначительно, зато существенно различие в коэффициентах F .

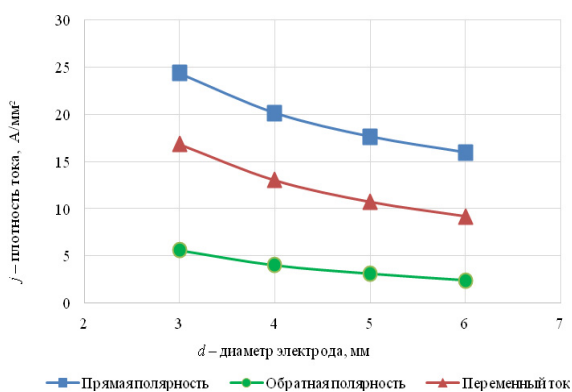


Рис. 1. Гиперболические зависимости плотности тока от диаметра электрода

По полученным средним значениям плотности тока уточняли средние значения допустимых токов для трех вариантов полярностей (см. табл. 2).

Среднее значение отношения μ для четырех диаметров $\mu = (I_C/I_{VC}) = 0,95$ находится между теоретическим значением 0,91 и 1 для омического сопротивления. Значения коэффициента μ возрастают при повышении тока, что связано с приближением формы напряжения дуги к синусоидальной.

Полученный результат означает, что допустимое среднее за период значение тока на вольфрамовый электрод на переменном синусоидальном токе промышленной частоты близко к полусумме допустимых токов дуг прямой и обратной полярностей.

В связи с зависимостью R от диаметра электрода аппроксимировали его значения из табл. 2 линейной функцией, коэффициенты которой также определяли с помощью стандартной программы [17]. Получили

$$R = 2,25 + 0,71d, \quad (2)$$

в которой d берется в миллиметрах.

Результаты расчета R приведены в табл. 4. Отклонения значений R_{OP} из опыта от расчетных R_P для всех диаметров составляют 0,03, относительные отклонения меньше 1%. В табл. 4 приведены и значения R для диаметров, которых нет в исходных данных.

Таблица 4

Сравнение опытных и аппроксимированных данных по R

d, мм	1,0	2,0	2,4	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0
R_{OP}	–	–	–	4,41	5,06	5,77	6,54	–	–
R_P	2,96	3,67	3,95	4,38	5,09	5,8	6,51	7,93	9,35
U_K	6,53	6,13	6,02	5,87	5,68	5,53	5,42	5,27	5,14

Представляет интерес сравнение отношений расчетных R_P допустимых токов на вольфрамовый электрод с отношением эффективных напряжений приэлектродных областей. В работе [19] обоснованы приближенные формулы для оценки таких напряжений в зависимости от катодного U_K и анодного U_A падений напряжения:

$$U_{ЭК} \approx U_K - U_B,$$

$$U_{ЭА} \approx U_A + U_B,$$

где $U_{ЭК}$, $U_{ЭА}$ – соответственно эффективные катодное и анодное падения напряжения, B ; U_B – напряжение, эквивалентное работе выхода электрода из металла, в данном случае из вольфрама. По данным работы [19], для вольфрама $U_B = 4,5$ В.

Большинство исследователей придерживаются мнения, что анодное падение напряжения не зависит от материала анода и силы тока. Поскольку в работе [14] получено эффективное значение напряжения для неплавящегося водоохлаждаемого анода $U_{ЭА} = 6,0$ В, отношение значений мощности в вольфрамовый электрод на обратной и прямой полярностях можно записать в виде

$$\frac{U_{ЭА}}{U_{ЭК}} \approx \frac{6}{U_K - 4,5}. \quad (3)$$

Если принять, что $U_{ЭА}/U_{ЭК} = R$ из табл. 4, то по формуле (3) можно произвести оценку катодного падения напряжения на вольфраме

$$U_K \approx \frac{6 + 4,5R}{R}.$$

Результаты расчета U_K приведены в последней строке табл. 4. С увеличением диаметра электрода с 1 до 10 мм U_K уменьшилось на 23 %. Это можно отнести к влиянию падения напряжения электрода в вылете, которое в большей степени проявляется у электродов меньшего диаметра. Полученная оценка $U_K \approx 5$ В хорошо согласуется с имеющимися экспериментальными данными. Так, в работе [19] сумма $U_K + U_A$ дуги вольфрам-вольфрам оценивается в 8–10 В.

При допущении, что выделение мощности в неплавящийся электрод в дуге с РПИ пропорционально допустимым токам прямой и обратной полярностей и относительной длительности времени протекания каждого импульса за период и оно определяет допустимые токи при РПИ, можно рассчитать допустимые токи для дуги с РПИ. Обозначим долю времени протекания тока обратной полярности в течение цикла ϕ . В качестве критерия допустимых токов лучше использовать более точные значения для прямой полярности. При равных токах импульсов можно записать

$$I_{ENS} = I_1 R \phi + (1 - \phi) I_1.$$

Отсюда

$$I_1 = \frac{I_{ENS}}{R\phi + 1 - \phi}. \quad (4)$$

При $\phi = 0$ (дуга прямой полярности) $I_1 = I_{ENS}$, при $\phi = 1$ $I_1 = I_{ENS}/R$.

При $\phi = 0,5$ формула (4) примет вид

$$I_1 = \frac{2I_{ENS}}{R + 1}. \quad (5)$$

Подставив R из формулы (2) в формулу (5), получим

$$I_1 = \frac{2I_{ENS}}{3,35 + 0,71d}. \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что значения токов импульсов при $\phi = 0,5$, что соответствует синусоидальному переменному току, примерно в 2 раза ниже, чем рекомендуемые в табл. 2.

По-видимому, такое расхождение объясняется тем, что в данных для переменного тока в табл. 2 не учтено влияние постоянной составляющей тока. В работе [20] величина постоянной составляющей оценивается в пределах $(0,28-0,37)I_m$. Тогда среднее значение постоянной составляющей от среднего значения переменного тока можно оценить в 0,2. В работе [20] приводятся данные

о том, что ряд исследователей считают наличие небольшой постоянной составляющей положительным фактором при сварке.

Постоянная составляющая увеличивает вклад прямой полярности в обеспечение стойкости неплавящегося электрода и уменьшает вклад обратной полярности. Ввиду этого может иметь место кажущееся повышение допустимых токов на неплавящийся электрод на переменном токе. При сварке обычно ранее реализовывали подавление постоянной составляющей тока, однако полностью достичь этого достаточно сложно.

Проводили сравнение расчетных значений допустимого тока с данными, приведенными в работе [7], для которых указана частота импульсов РПИ. Для электродов марки ЭВЛ $d = 2$ мм, по данным работы [7], допустимый ток прямой полярности $I_{EN} = 255$ А. Тогда при $\phi = 0,5$ по формуле (6) $I_1 = 107$ А. Экспериментальное значение 120 А достаточно близко к расчетному. Следует учесть, что значения коэффициента R для данной марки электрода носит ориентировочный характер.

В работе [21] при исследовании влияния баланса полярностей в диапазоне $EP = 20...30$ % на проплавление алюминиевого сплава толщиной 4 мм при среднем токе 170 А средний ток за период обратной полярности при $EP = 20$ % составил 50 А, а при $EP = 30$ % 30 А при токе EN 200 А. Таким образом, использование более высоких значений баланса, чем 30 %, вызывает, по-видимому, проблемы.

В связи с этим возможен двоякий подход к расчету допустимых токов в дуге с РПИ: максимальное значение определять по полусумме допустимых токов на прямой и обратной полярностях и минимальное значение по изложенной выше методике. Большое различие в двух методиках может быть обусловлено тем, что в рекомендациях по допустимому переменному току не учитывалось влияние постоянной составляющей тока прямой полярности.

Наибольший интерес при сварке алюминия представляет относительная длительность обратной полярности $\phi = 0,25$, которая надежно обеспечивает катодное разрушение окисной пленки и в то же время не перегружает вольфрамовый электрод. На рис. 2 представлена расчетная зависимость минимального тока импульса от диаметра электрода.

Зависимость I на рис. 2 близка к линейной, что совпадает с результатами, полученными в работе [8], для прямой полярности дуги. Кроме того, была рассчитана составляющая эффективной мощности дуги от действия катодной и анодной областей у изделия по методике работы [22].

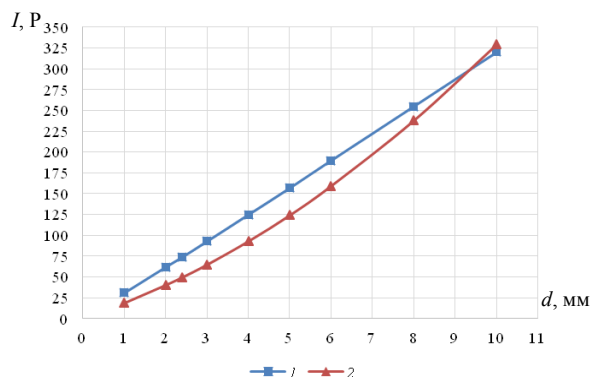


Рис. 2. Зависимости минимального тока импульса и мощности приэлектродных областей от диаметра электрода: 1 – ток дуги; 2 – мощность [8]

С увеличением диаметра электрода эффективная мощность нарастает с повышенной интенсивностью, почти в 2 раза опережая его увеличение (см. рис. 2, кривая 2).

Выводы

1. Тепловую эффективность сварочных дуг переменного тока с дугами постоянного тока следует сравнивать по среднему за период переменному току.

2. Для каждой полярности получены аппроксимирующие гиперболы зависимости допустимой плотности тока в сечении электрода от его диаметра, которые позволяют экстраполировать значения плотностей тока вне исследованного диапазона диаметров 3–6 мм.

3. Марка электрода при сварке алюминия РПИ мало влияет на допустимые токи, так как преобладающее значение имеет мощность, выделяемая на обратной полярности, для которой эмиссионные свойства электрода незначительны. Исходя из этого, наиболее рационально для РПИ использовать электроды из чистого вольфрама. Эту же рекомендацию можно отнести и к сварке однофазной дугой переменного тока.

Произведено сравнение методик определения допустимого разнополярного импульса тока прямоугольной формы по отношению допустимых токов на прямой и обратной полярностях стационарных дуг и как полусуммы токов таких дуг. Первая методика может использоваться для оценки минимально допустимого тока, а вторая – для максимального.

Список литературы

1. Савинов А.В., Лапин И.Е., Лысак В.И. Дуговая сварка неплавящимся электродом. – М.: Машиностроение, 2011. – 477 с.
2. Основные тенденции развития плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов / А.А. Гринюк, В.Н. Коржик, В.Е. Шевченко [и др.] // Автоматическая сварка. – 2015. – № 11. – С. 39–50.

3. Влияние рода и полярности тока на плавление электродного и основного металла при сварке под флюсом / Н.В. Коберник, Г.Г. Чернышов, П.П. Гвоздев [и др.] // Сварка и диагностика. – 2011. – № 5. – С. 24–27.

4. Влияние асимметрии разнополярного тока прямоугольной формы на параметры швов при аргонодуговой сварке сплавов АМг6 / А.Я. Ищенко, А.Г. Покляцкий, М.Р. Яворская [и др.] // Автоматическая сварка. – 1990. – № 1. – С. 26–28.

5. Сидоров В.П., Советкин Д.Э., Борисов Н.А. О плавлении алюминиевого электрода аргоновой дугой прямой полярности // Вектор науки ТГУ. – 2019. – № 4(50). – С. 52–57.

6. Рыкалин Н.Н., Николаев А.В., Асонов А.Н. Электрические и энергетические характеристики плазменной дуги при модуляции тока // Автоматическая сварка. – 1975. – № 11. – С. 1–5.

7. Савинов А.В. Стойкость неплавящихся электродов при аргонодуговой сварке на переменном токе // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2013. – № 6. – С. 142–147.

8. Атрощенко В.В., Бычков В.М., Селиванов А.С. Экспериментальное определение предельных токовых нагрузок для лантанированных вольфрамовых электродов // Вестник УГАТУ. Энергетика. Электротехнические комплексы и системы. – 2009. – Т. 13, № 1 (34). – С. 161–165.

9. Стрельников И.В., Коновалов А.В. Определение оптимальной геометрии вольфрамового электрода при точечной сварке сжатой дугой // Известия вузов. Машиностроение. – 2011. – № 6. – С. 53–57.

10. Петров Г.Л. Сварочные материалы. – Л.: Машиностроение, 1972. – 280 с.

11. Алексеев А.А. Управление параметрами режима аргонодуговой сварки алюминиевых сплавов неплавящимся электродом: магистер. дис. – Томск, 2017. – 96 с.

12. Cho J., Lee J.-J., Bae S.-H. Heat input analysis of variable arc welding of aluminum // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – Vol. 81. – P. 1273–1280. DOI 10.1007/s00170-015-7292-y

13. Пономарев К.Е., Стрельников И.В. К вопросу выбора марки вольфрамовых электродов для сварки (обзор) // Сварка и Диагностика. – 2019. – № 1. – С. 32–37.

14. Быховский Д.Г., Беляев В.М. Энергетические характеристики плазменной дуги при сварке на обратной полярности // Автоматическая сварка. – 1971. – № 5. – С. 27–30.

15. Ерохин А.А. Основы сварки плавлением. – М.: Машиностроение, 1973. – 448 с.

16. Сидоров В.П. Энергетические характеристики сжатой сварочной дуги в аргоне. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2011. – 236 с.

17. Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке Бейсик для персональных ЭВМ. – М.: Наука, 1987. – 240 с.

18. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. – М.: Высш. шк., 1988. – 239 с.

19. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. – М.: Машиностроение, 1970. – 335 с.

20. Короткова Г.М. Источники питания переменного тока для сварки неплавящимся электродом алюминиевых сплавов. – Тольятти, 2009. – 335 с.

21. Wang L.L., Wei J.H., Wang Z.M. Numerical and experimental investigations of variable polarity gas tungsten arc welding // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 95. – P. 2421–2428. DOI.org/ 10.1007/s00170-017-1387-6

22. Сидоров В.П., Советкин Д.Э. Влияние баланса полярностей на эффективную мощность дуги при точечной плазменной сварке алюминиевых сплавов // Вестник РГУПС. – 2019. – № 4. – С. 23–26.

References

1. Savinov A.V. Dugovaia svarka neplaviashchimsia elektrodom [Arc welding with non-combustible electrode]. Ed. A.V. Savinov, I.E. Lapin, V.I. Lysak. Moscow.: Mashinostroenie, 2011, 477 p.
2. Griniuk A.A. et al. Osnovnye tendentsii razvitiia plazmenno-dugovoi svarki aliuminievykh splavov [Main trends in plasma arc welding of aluminum alloys]. *Avtomaticheskaia svarka*, 2015, no. 11, pp. 39–50.
3. Kobernik, N.V. et al. Vliianie roda i poliarnosti toka na plavlenie elektrodov i osnovnogo metalla pri svarke pod flusom [Influence of genus and polarity of current on melting of electrode and base metal during submerged-arc welding.] *Svarka i diagnostika*, 2011, no. 5, pp. 24–27.
4. Ishchenko A.Ia. et al. Vliianie asimmetrii raznopolarnogo toka priamougol'noi formy na parametry shvov pri argonodugovoi svarke splavov AMg6 [Influence of asymmetry of different polar current of rectangular shape on parameters of joints at argon-arc welding of alloys AMg6]. *Avtomaticheskaia svarka*, 1990, no. 1, pp.26 – 28.
5. Sidorov V.P., Sovetkin D.E., Borisov N.A. O plavlenii aliuminievogo elektroda argonovoi dugoi priamoj poliarnosti [About the melting of the aluminum electrode with straight polarity argon arc]. *Vektor nauki TGU*, 2019, no. 4(50), pp. 52–57.
6. Rykalin N.N., Nikolaev A.V., Asonov A.N. Elektricheskie i energeticheskie kharakteristiki plazmennoi dugi pri moduliatsii toka [Electrical and energy characteristics of the plasma arc at current modulation]. *Avtomaticheskaia svarka*, 1975, no. 11, pp. 1 – 5.
7. Savinov A.V. Stoikost' neplaviashchikhsia elektrodov pri argonodugovoi svarke na peremennom toke [Resistance of nonmelting electrodes at argon-arc welding at alternating current]. *Izvestiia Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, no. 6, pp. 142-147.
8. Atroshchenko V.V., Bychkov V.M., Selivanov A.S. Eksperimental'noe opredelenie predel'nykh tokovykh nagruzok dlia lantanirovannykh vol'framovykh elektrodov [Experimental determination of current limit loads for lanthaned tungsten electrodes]. *Vestnik UGATU. Energetika. Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy*, 2009, vol. 13, no. 1 (34), pp.161-165.
9. Strel'nikov I.V., Konovalov A.V. Opredelenie optimal'noi geometrii vol'framovogo elektroda pri tochechnoi svarke szhati dugoi [Determination of the optimal tungsten electrode geometry for spot welding with compressed arc]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*, 2011, no. 6, pp. 53-57.
10. G.L. Petrov. Svarochnye materialy [Welding materials]. Leningrag: Mashinostroenie, 1972. 280 p.
11. Alekseev A.A. Upravlenie parametrami rezhima argonodugovoi svarki aliuminievykh splavov neplaviashchimsia elektrodom. Magisterskaia dissertatsiia [Control of parameters of argon-arc welding mode of aluminum alloys by nonmelting electrode]. Tomsk. TPU, 2017, 96 p.
12. J.Cho, Jung-Jae Lee, Seung-Hwan Bae. Heat input analysis of variable arc welding of aluminum. *International Journal Advance Manuf. Technol.*, 2015, no. 81, pp. 1273–1280. DOI 10.1007/s00170-015-7292-y.
13. Ponomarev K.E., Strel'nikov I.V. K voprosu vybora marki vol'framovykh elektrodov dlia svarki (obzor) [Regarding the choice of tungsten electrode grade for welding (overview)]. *Svarka i Diagnostika*, 2019, no. 1, pp. 32–37.
14. Bykhovskii D.G., Beliaev V.M. Energeticheskie kharakteristiki plazmennoi dugi pri svarke na obratnoi poliarnosti

[Power characteristics of the plasma arc at reverse polarity welding]. *Avtomaticheskaia svarka*, 1971, no. 5, pp. 27-30.

15. Erokhin A.A. Osnovy svarki plavleniem [Foundations of fusion welding]. Moscow: Mashinostroenie, 1973, 448 p.
16. Sidorov V.P. Energeticheskie kharakteristiki szhati svarochnoi dugi v argone [Energy performance of compressed welding arc in argon]. Tol'iaty: TGU, 2011, 236 p.
17. D'iakonov V.P. Spravochnik po algoritmam i programmam na iazyke Beisik dlia personal'nykh EVM [Manual of algorithms and programs in Basic language for personal computers]. Moscow: Nauka, 1987, 240 p.
18. L'vovskii E.N. Statisticheskie metody postroeniia empiricheskikh formul [Statistical methods for constructing empirical formulas]. Moscow: Vyssh. shk., 1988, 239 p.
19. Leskov G.I. Elektricheskaia svarochnaia duga [Electric arc welding]. Moscow: Mashinostroenie, 1970, 335 p.
20. Korotkova G.M. Istochniki pitaniia peremennogo toka dlia svarki neplaviashchimsia elektrodom aliuminievykh splavov [AC power supplies for welding with non molten aluminum alloy electrode]. Tol'iaty, TGU, 2009, 335 p.
21. Wang L.L., Wei J.H., Wang Z.M. Numerical and experimental investigations of variable polarity gas tungsten arc welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, no. 95, pp. 2421–2428. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1387-6>.
22. Sidorov V.P., Sovetkin D.E. Vliianie balansa poliarnosti na effektivnuiu moshchnost' dugi pri tochechnoi plazmennoi svarke aliuminievykh splavov [Influence of polarity balance on effective arc power at spot plasma welding of aluminium alloys]. *Vestnik RGUPS*, 2019, no. 4, pp.23-26.

Получено 14.09.2020

Опубликовано 10.12.2020

Сведения об авторах

Сидоров Владимир Петрович (Тольятти, Россия) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры сварки, обработки материалов давлением и родственных процессов Тольяттинского государственного университета, e-mail: vladimir.sidorov.2012@list.ru.

Советкин Дмитрий Эдуардович (Тольятти, Россия) – магистр, старший преподаватель кафедры сварки, обработки материалов давлением и родственных процессов Тольяттинского государственного университета, e-mail: mitya.sovetkin@yandex.ru.

Короткова Галина Михайловна (Тольятти, Россия) – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры сварки, обработки материалов давлением и родственных процессов Тольяттинского государственного университета, e-mail: Korotkova_G.M.@tlt.su.ru.

About the authors

Vladimir P. Sidorov (Tolyatti, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Welding, Material Forming and Related Processes, Togliatti State University, e-mail: vladimir.sidorov.2012@list.ru.

Dmitry E. Sovetkin (Tolyatti, Russian Federation) – Graduate Student, Assistant Professor, Department of Welding, Material Forming and Related Processes, Togliatti State University, e-mail: mitya.sovetkin@yandex.ru.

Galina M. Korotkova (Tolyatti, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Department of Welding, Material Forming and Related Processes, Togliatti State University, e-mail: Korotkova_G.M.@tlt.su.ru.