

Сидоров В.П., Советкин Д.Э. Эффективная мощность разнополярной дуги в аргоне с вольфрамовым электродом при сварке алюминия // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 5–12. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.1.01

Sidorov V.P., Sovetkin D.E. Effective power of bipolar argon arc with a tungsten electrode for aluminum welding. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2021, vol. 23, no. 1, pp. 5–12. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.1.01

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 23, № 1, 2021

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

DOI: 10.15593/2224-9877/2021.1.01
УДК 621.791.75

В.П. Сидоров, Д.Э. Советкин

Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия

ЭФФЕКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ РАЗНОПОЛЯРНОЙ ДУГИ В АРГОНЕ
С ВОЛЬФРАМОВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ ПРИ СВАРКЕ АЛЮМИНИЯ

Рассмотрены результаты расчетов эффективной мощности сварочной дуги с разнополярными прямоугольными импульсами тока частотой 50 Гц по размерам сварных швов на алюминиевом сплаве AA1060 толщиной 4 мм при скорости сварки 2,5 мм/с. Средний ток импульсов за период оставался неизменным 170 А, а длительность импульсов обратной полярности устанавливалась на трех уровнях – 20, 25 и 30 %. В результате численных экспериментов по математической модели установлено, что эффективная мощность снижается с 2080 до 1843 Вт. Причиной этого является снижение среднего за период тока импульсов обратной полярности с 50 до 30 А. Это свидетельствует о более высокой тепловой эффективности дуги обратной полярности, которую следует оценивать удельной эффективной мощностью на 1 А тока. Для учета вклада плазменного потока в эффективную мощность дуги были использованы предложенные формулы для мощности от приэлектродных областей. В результате получили для всех режимов стабильное значение удельной эффективной мощности плазменных потоков 3,28 Вт/А при среднем алгебраическом отклонении 4,4 %. Это приводит к простым формулам для определения эффективной мощности. Средний эффективный КПД дуги прямой полярности составляет 75 %, а дуги обратной полярности 65 %. КПД в импульсах обратной полярности хорошо совпадает с полученным КПД дуги обратной полярности с плавящимся электродом, если вычесть мощность, передаваемую изделию каплями электродного металла. Найденные значения КПД позволяют выполнять расчеты проплавления изделий при сварке РПИ и плавящимся электродом.

Ключевые слова: сварочная дуга, алюминий, вольфрамовый электрод, аргон, математическая модель, ширина шва, обратная полярность, разнополярные импульсы, эффективная мощность, методика расчета.

V.P. Sidorov, D.E. Sovetkin

Togliatti State University, Togliatti, Russian Federation

EFFECTIVE POWER OF BIPOLAR ARGON ARC WITH A TUNGSTEN
ELECTRODE FOR ALUMINUM WELDING

This article shows the calculation results for effective power of the welding arc with bipolar rectangular current pulses of 50 Hz by weld size on AA1060 aluminum alloy of 4 mm thickness at a welding speed of 2.5 mm/s. The average pulse current showed no changes and was 170 A, and reverse polarity pulses duration was set at three levels – 20, 25, and 30 %. As a result of numerical experiments based on a mathematical model, it was determined that the effective power decreases from 2,080 to 1,843 W. The reason is a decrease in the average pulse current of reverse polarity from 50 to 30 A. This indicates a higher thermal efficiency of the reverse polarity arc which shall be estimated by the specific effective power per 1 A of current. To account for the plasma gas flow contribution to the effective arc power, we used the proposed formulas for the power from the electrode sheaths. As the result, for all welding conditions, we have obtained a stable value of the plasma gas flow specific effective power of 3.28 W/A at an average algebraic deviation of 4.4 %. This tends to the simple formulas for effective power calculation. The average effective efficiency is 75 % for the direct polarity arc and 65 % for the reverse polarity arc. The reverse polarity pulses efficiency coincides well with the obtained efficiency for the reverse polarity arc with a consumable electrode, if we subtract the power transferred to the article by electrode metal droplets. The obtained efficiency values make it possible to calculate the penetration for bipolar rectangular current pulses and consumable electrode welding.

Keywords: welding arc, aluminum, tungsten electrode, argon, mathematical model, weld width, reverse polarity, bipolar pulses, effective power, calculation method.

Введение

В последнее время изучению энергетических характеристик сварочной дуги в аргоне при сварке алюминиевых и магниевых сплавов разнополяр-

ными прямоугольными импульсами тока (РПИ) вольфрамовым электродом уделяется существенное внимание [1]. Этот способ сварки получил в зарубежной литературе специальное название VP-GTAW (Variable Polarity-Gas Tungsten Argon

Welding). Важной характеристикой дуги с РПИ является отношение времени действия дуги обратной полярности t_{EP} к периоду тока $\alpha = t_{EP}/t$. В зарубежной литературе принято прямую полярность обозначать EN, а обратную EP. Помимо возможности разрушения окисной пленки для этого способа сварки характерно положительное влияние пульсаций на структуру сварного шва [2, 3]. Причиной этого может быть пульсирующий характер давления дуги, на что указано в работах [4, 5].

Для анализа процессов, происходящих в дуге с РПИ, особенно важно изучение катодной области дуги в условиях плоского электрода. Для медной подложки структура катодного пятна дуги при атмосферном давлении исследовалась в работе [6]. Механизм разрушения окисной пленки алюминия дугой обратной полярности изучался в работах [7–9]. В работе [8] получено, что в целом с увеличением доли времени обратной полярности α на разных токах имеется тенденция к увеличению площади проплавления основного металла, но эта тенденция нестабильна. В результате авторы предложили объяснение особенностям выделения мощности в катодном пятне на алюминиевом изделии, согласно которому она зависит от толщины окисной пленки в зоне сварки и случайного блуждания дуги в сторону большей толщины пленки. В работе [9] выполнены эксперименты, на основании которых ставится под сомнение общепринятая теория разрушения окисной пленки алюминия.

В работе [10] пришли к выводу, что в диапазоне частот импульсов 50–400 Гц технологические свойства дуги не изменяются. В работе [4] высказано мнение, что удовлетворительная очистка поверхности алюминия от окисной пленки Al_2O_3 имеет место при $\alpha \geq 0,2$. Авторы работы [4] также исследовали зависимость эффективного КПД дуги с РПИ от длительности импульса обратной полярности t_{EP} при частоте 50 Гц. Ими наблюдалось изменение эффективного КПД в пределах $\eta = 0,47 \dots 0,60$. Для вольфрамового электрода диаметром 2 мм КПД имел минимум $\eta = 0,52$ при $\alpha = 0,2$, для больших диаметров аналогичный минимум вероятен при больших значениях отношения $t_{EP}/t_{П}$. Максимальные значения η имеют место при минимуме отношения $\alpha = t_{EP}/t_{П}$, поэтому авторы рекомендуют при сварке использовать небольшие значения α . Кроме того, использованию больших значений α мешают ограничения по стойкости вольфрамовых электродов. При остро заточенном электроде диаметром 3 мм с небольшим притуплением на конце увеличение тока с 100 до 300 А снизило КПД с 0,65 до 0,52 при $t_{EN} = 2,5$ мс. Авторами обнаружено существенное повышение термического КПД η_t

для такого же диапазона токов у электродов диаметром 2,4 мм при $t_0 = 3,75$ мс. Увеличение длительности импульсов тока обратной полярности приводит к незначительному росту η_t . Как и в работе [10], авторы работы [4] пришли к выводу о незначительном влиянии частоты импульсов на тепловую эффективность дуги с РПИ.

В работе [11] наряду с исследованием эффективного КПД дуги прямой полярности были получены и данные для дуги обратной полярности на низкоуглеродистой стали при малых токах в диапазоне 30–60 А. Небольшие значения исследованных токов объясняются низкой стойкостью вольфрамового электрода. Эффективный КПД дуги обратной полярности авторы работы [11] оценили в $(52 \pm 4) \%$. При этом напряжение дуги составляло 23 В и расчет удельной эффективной мощности на 1 А тока дал нам значение $q_y = (12 \pm 4) \%$ Вт/А. Аналогичный показатель для дуги прямой полярности в диапазоне токов 140–180 А составляет, согласно данным работы [11], $q_y = 8,7$ Вт/А. Таким образом, на обратной полярности при малых токах на 1 А на стали выделяется почти на 40 % больше эффективной мощности, чем на прямой. Можно утверждать, что энергетические характеристики дуг обратной полярности с вольфрамовым электродом на стали и алюминии во многом подобны, о чем свидетельствуют, например, близкие значения напряжения дуг, а также разница значений напряжения в полупериодах в однофазной дуге, приводящая к появлению постоянной составляющей тока.

Ряд исследований посвящены различным аспектам математического моделирования численными методами сложных процессов, протекающих в дуге с РПИ. В работах [12, 13] моделирование образования сварочной ванны было выполнено на основе совместного моделирования тепловых и силовых характеристик дуги. В работе [14] моделировалось давление плазменной струи на изделие с иных позиций.

В работе [15] проводили исследование тепловой эффективности при плазменной сварке с РПИ. Авторы использовали специальный источник питания, позволяющий отдельно регулировать длительность протекания токов импульсов прямой и обратной полярностей. Опыты выполнялись при двух уровнях баланса полярностей. Длительность прямой полярности не изменялась и составляла $t_{EN} = 21$ мс, а длительности обратной полярности задавали два значения $t_{EP} = 2$ мс и $t_{EP} = 8$ мс. Нужно отметить, что режим с $t_{EP} = 2$ мс не отвечает условию качественного разрушения окисной пленки алюминия $t_{EP}/t_{EP} \geq 0,2$ [4]. Изменяли ток импульсов одной полярности, не изменяя ток импульсов вто-

рой. Дуга горела на медный, охлаждаемый проточной водой калориметр. В результате решения систем уравнений были рассчитаны эффективные мощности и эффективные КПД дуг обеих полярностей. Однако полученные результаты без специального анализа не могут быть использованы для свободной дуги вследствие большой роли плазмообразующего газа в передаче энергии изделию. Для такого анализа следует привлекать и результаты исследований энергетических характеристик сжатой дуги обратной полярности на постоянном токе [16].

В работе [17] разработана численная математическая модель процесса сварки алюминиевых сплавов дугой с РПИ, в результате которой была оценена относительная тепловая эффективность полярностей при их совместном действии при сварке. Сила тока импульсов была равной 150 А, напряжение дуги принималось усредненным 16 В. Расчеты выполняли для трех значений $\alpha = 0,15 \dots 0,45$. КПД дуги прямой полярности принимался $\eta_{EN} = 0,7$, а КПД обратной полярности имел два разных значения относительно прямой полярности от $\eta_{EP} = 1,143\eta_{EN}$ до $\eta_{EP} = 1,286\eta_{EN}$. С увеличением α более выражен рост площади проплавления при $\eta_{EP} = 1,286\eta_{EN}$, который составил 46 % против 23 %.

В работе [18] при численном моделировании баланс полярностей α принимал четыре значения – от 0,15 до 0,45, с шагом 0,1. Сила тока импульсов была более значительной – $I = 280$ А. Эффективный КПД на прямой полярности принимали $\eta_{EN} = 0,25$, а на обратной полярности задавали пять значений – от $\eta_{EP} = 0,55$ до $\eta_{EP} = 0,95$, с шагом 0,1. В диапазоне $\alpha = 0,15 \dots 0,35$ площадь поперечного сечения проплавления основного металла оставалась на одном уровне. По нашим расчетам, для трех экспериментальных значений $\alpha = 15 \dots 35$ % среднее алгебраическое отклонение (САО) [19] экспериментальных значений площади проплавления составляет 1,5 %, а расчетные значения при тех же параметрах САО = 3,6 %. При увеличении соотношения до $\alpha = 45$ % экспериментальная площадь провара увеличивается на 25 %, а расчетная на 22,5 %. Как следует из данных работы [11], использованные значения КПД и в этом случае не отвечают наблюдавшимся экспериментально.

В работе [20] численное моделирование дуги с РПИ использовалось для оценки эффективности проплавления алюминиевого сплава АА1060. Толщина пластин составляла 4 мм, скорость сварки 2,5 мм/с. Средний ток дуги за период не изменялся при изменении тока импульсов прямой и обратной полярностей и отношения α . Для расчета эффективной мощности использовали эффективный КПД обеих дуг $\eta_{EN} = \eta_{EP} = 0,72$, что не вполне корректно, так как, по

данным источника [11], КПД дуги обратной полярности $\eta_{EP} \approx 0,5$. Фиксировались средние значения тока и напряжения дуг в импульсах. Полученные эффективные мощности импульсов использовали для расчета при численном моделировании размеров сварочной ванны. По итогам моделирования, как и на экспериментальных шлифах, было обнаружено, что ширина шва с обратной стороны пластины иногда больше, чем его ширина в ее срединной области. Такое явление авторы объяснили действием эффекта Марангони, который учитывался в разработанной модели. Сходимость расчетных и опытных размеров шва в работе [20] хорошая, однако на фотографии лицевой стороны шва при $\alpha = 30$ % видно существенное уменьшение ширины шва по его длине.

В работах [21, 22] на основе анализа экспериментальных данных по напряжениям дуг прямой и обратной полярностей были предложены формулы для расчета удельной эффективной мощности от действия приэлектродных областей дуги на алюминиевую деталь, которые хорошо описывают скорость плавления алюминиевой проволоки при наплавке дугой прямой и обратной полярностей. Также они дают верную оценку разности эффективных мощностей дуг при сварке сжатой дугой алюминиевых сплавов с РПИ при различном балансе полярностей α . В работе [23] экспериментально исследована эффективная мощность дуги обратной полярности с плавящимся электродом при наплавке алюминиевого сплава и выполнена оценка структуры этой мощности, состоящей из вклада катодной области, капель электродного металла и мощности плазменной струи. Однако остается неясным, можно ли использовать полученные результаты для дуги обратной полярности с плавящимся электродом для описания процессов в дуге с РПИ.

Целью данной работы являлось уточнение представлений об энергетических процессах в дуге с РПИ посредством определения тепловложения от действия приэлектродных областей дуги, которые являются определяющими в проплавлении основного металла [24].

Методика исследований

В данной работе решали задачу использования формул, полученных в работах [21, 22] при определении мощности, полученной численным моделированием в работе [20], и их сравнения. По данным работы [20] рассчитывали среднее напряжение дуг за период U_s , удельную эффективную мощность q_1 , эффективный КПД для каждого режима. Исходные и расчетные данные по работе [20] представлены в табл. 1.

Таблица 1

Анализ расчетных данных по работе [20]

Параметр	Номер режима		
	1	2	3
% EP = α	20	25	30
I _{EN} , А	150	175	200
U _{EN} , В	13	13,5	14
I _{EP} , А	250	155	100
U _{EP} , В	26,6	22,4	20
q, Вт	2080	1901	1843
E ₁ , мм	10,1	9,3	8,2
E ₂ , мм	6,4	5,2	3,6
q ₁ , Вт/А	12,24	11,18	10,84
U _S , В	15,72	15,73	15,8
η	0,779	0,711	0,686
η _S	0,725		
I _{EPS} , А	50	38,75	30
I _{ENS} , А	120	131,25	140
I _{EPS} /I _{ENS} , %	29,4	22,8	17,6

Примечание: выделены исходные данные. E₁ – расчетная ширина шва с лицевой стороны; E₂ – расчетная ширина шва с обратной стороны; I_{EPS}, I_{ENS} – средние за период токи полярностей.

Результаты исследований и их обсуждение

При сохранении среднего тока дуги 170 А средний ток обратной полярности за период снизился с 50 до 30 А, а средний ток прямой полярности соответственно увеличился до 140 А. Иными словами, полученные результаты можно трактовать так, что снижение доли тока обратной полярности α с 29,4 до 17,6 % привело к снижению полной эффективной мощности примерно на 10 % и, соответственно, эффективного КПД. Это свидетельствует о том, что увеличение доли обратной полярности α при одинаковых токах импульсов должно приводить к повышению эффективной мощности дуги. Следует также обратить внимание, что среднее за период напряжение дуги практически не изменилось, несмотря на существенное падение напряжения дуги обратной полярности с увеличением тока. Значение удельной эффективной мощности изделия при α = 20 % достаточно близко к значению при исследовании эффективной мощности дуги с плавящимся электродом обратной полярности, если из последней вычесть мощность, переносимую каплями электродного металла [23]. По-видимому, об эффективной мощности дуги с РПИ следует судить не по доле времени обратной полярности α, а по доле ее среднего тока за период по отношению к среднему току дуги в целом. Оценку по балансу полярностей можно производить только для источников с равными токами импульсов, что и имеет место у наиболее распространенных и доступных источников питания.

Оценку разности значений эффективной мощности можно провести по методике, изложенной в работах [21, 22]. Формулы для удельных эффективных мощностей в алюминиевое изделие от приэлектродных областей или в электродную проволоку при сварке плавящимся электродом на обратной полярности имеют вид

$$q_{1EN} = 4,86 + 1,15 \cdot 10^{-2} I; \quad (1)$$

$$q_{1EP} = 7,94 + 2,38 \cdot 10^{-2} I, \quad (2)$$

где I – средний ток импульса данной полярности, А.

По формулам (1) и (2) рассчитывали, по данным табл. 1, удельные катодную q_{1EP} и анодную q_{1EN} эффективные мощности, полные эффективные мощности и их сумму (табл. 2).

Таблица 2

Расчет удельной мощности от приэлектродных областей дуг

Параметр	Номер режима		
	1	2	3
% EP = α	20	25	30
q _{1EN} , Вт/А	6,59	6,87	7,16
q _{1EP} , Вт/А	13,89	11,63	10,32
q _{EN} , Вт	791	902	1002
q _{EP} , Вт	695	451	310
q _{EN} + q _{EP} , Вт	1486	1353	1312
q _П , Вт	594	548	529
q _П , Вт/А	3,49	3,22	3,11
q _{ГС}	557		
Δ, %	+6,6	-1,6	-5,0
CAO	4,4		
η _{EP}	0,534	0,519	0,516
η	0,523 (CAO = 5,2 %)		
η _{EN}	0,507	0,509	0,511
η	0,509 (CAO = 1 %)		

Примечание: q_{EN}, q_{EP} – средние эффективные мощности за период.

Графики изменения удельных эффективных мощностей приведены на рис. 1.

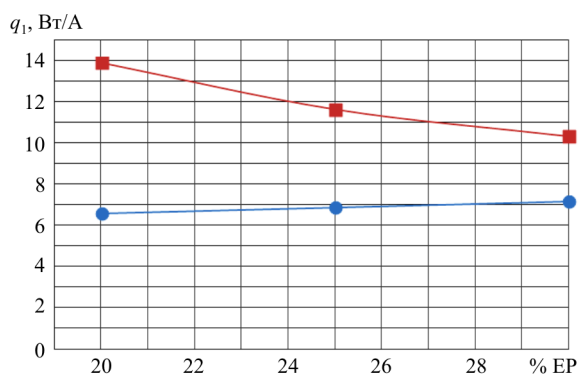


Рис. 1. Графики изменения удельных эффективных мощностей: —●— — прямая полярность; —■— — обратная полярность

Согласно результатам работы [20], разность эффективных мощностей составляет 237 Вт, а по формулам (1) и (2) получили разность 174 Вт, что следует считать хорошим совпадением, учитывая, что это не абсолютные значения, а разности. Некоторое влияние на разность мощностей можно объяснить различием в мощности плазменных потоков при столь различных токах дуг. При доле обратной полярности $\alpha = 0,2$ вклад катодной и анодной областей почти одинаков (рис. 2), в то время как при $\alpha = 0,3$ обратная полярность дает только 30 % эффективной мощности при общем ее снижении. Сумма расчетных приэлектродных мощностей примерно на 1/3 меньше полных эффективных мощностей, полученных в работе [8].

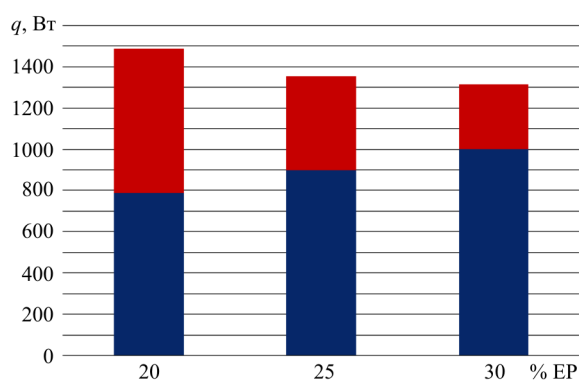


Рис. 2. Общий вклад мощностей при различной доле обратной полярности: ■ EN – прямая полярность; ■ EP – обратная полярность

Разница объясняется ролью мощности, передаваемой изделию плазменными потоками, поскольку формулы (1) и (2) не учитывают такие мощности. Ввиду этого КПД приэлектродных мощностей по отношению к полной мощности дуг близок для обеих дуг к 0,5, несмотря на значительную разницу в напряжениях дуг. Эта разница на первом режиме составляет 13,6 В, а на третьем 6 В. Коэффициент пропорциональности для напряжения дуги прямой полярности по трем значениям табл. 1 $(dU/dI) = +0,02$ В/А, для обратной – $(dU/dI) = +0,04$ В/А. По этой причине в однофазной дуге переменного тока постоянная составляющая тока должна снижаться с его увеличением, что и имеет место по данным работы [25]. Данные по $q_{EP} = 13,89$ Вт/А на первом режиме при токе 250 А хорошо согласуются с данными работы [23] по эффективной мощности при наплавке алюминиевого сплава дугой обратной полярности, которая составила 14,6 Вт/А. Удельная эффективная мощность для дуги обратной полярности уменьшается с большей интенсивностью, чем растет для прямой полярности (см. рис. 1).

Именно этим объясняется то, что вклад прямой полярности в общую мощность растет при ее небольшом уменьшении.

Для оценки вклада плазменных потоков q_{II} вычитали из полной эффективной мощности мощность от приэлектродных областей дуги и рассчитывали удельную эффективную мощность q_{II} (см. табл. 2). С увеличением доли обратной полярности вклад плазменных потоков немного повышается. В среднем $q_{II} = 3,28$ Вт/А при небольшом уменьшении с увеличением импульсов прямой полярности. Статистическая обработка дает низкое значение САО, что свидетельствует о малом разбросе данных q_{II} .

Формулы (1) и (2) можно уточнить с учетом влияния мощности плазменных потоков, если к постоянным членам формул приплюсовать полученную удельную эффективную мощность q_{II} . Тогда формулы примут вид

$$q_{IENP} = 8,14 + 1,15 \cdot 10^{-2} I; \quad (3)$$

$$q_{IEPP} = 11,22 + 2,38 \cdot 10^{-2} I. \quad (4)$$

Принятое допущение равносильно тому, что удельная мощность плазменных потоков не зависит от тока дуги и учитывается в постоянных коэффициентах формул (3) и (4).

Результаты сравнения данных, полученных в работе [20], и расчетных приведены в табл. 3.

Таблица 3

Основные энергетические характеристики дуги с РПИ

Параметр	Номер режима		
	1	2	3
% EP	20	25	30
q_{IEN} , Вт/А	9,87	10,15	10,44
q_{IEP} , Вт/А	17,17	14,91	13,6
q_{EN} , Вт	1481	1776	2088
$(1 - \alpha)q_{EN}$, Вт	1185	1332	1462
η_{EN}	0,76	0,75	0,75
q_{EP} , Вт	4293	2311	1360
αq_{EP} , Вт	859	578	408
η_{EP}	0,65	0,67	0,68
q , Вт	2044	1910	1870
Δ , %	-1,73	+0,5	+1,5
САО	1,24 %		

Примечание: Δ , % – относительное отклонение от данных работы [20].

В дугах прямой и обратной полярностей КПД остается примерно на одном уровне, о чем свидетельствуют небольшие САО этих величин. В среднем КПД дуги прямой полярности на 7,4 % выше, чем дуги прямой полярности, однако дугу обратной полярности следует считать более эффективной с точки

зрения ее проплавающей способности, несмотря на большое различие напряжений дуг. Общий КПД дуги снижается с уменьшением среднего тока обратной полярности с 0,714 до 0,598, т.е. почти на 19 %. Значения эффективного КПД обратной полярности в опыте № 3 на токе 100 А намного выше, чем полученные в работе [3] на малых токах на стали.

В свете данных, приведенных в табл. 3, становится понятна хорошая сходимость расчетных результатов работы [20] по ширине сварных швов. Разница в эффективных КПД двух полярностей получается небольшой.

Если из эффективной мощности, передаваемой при сварке на обратной полярности плавящимся электродом, вычесть мощность, передаваемую изделию каплями электродного металла, то получаем эффективный КПД $\eta_{EP} = 0,62$ [23]. Это очень близко к значению, приведенному в табл. 3, – $\eta_{EP} = 0,65$ при токе 250 А. По-видимому, при расчете тепловых процессов при сварке плавящимся электродом в защитных газах на обратной полярности следует пользоваться именно таким значением эффективного КПД – $\eta = 0,62 \dots 0,65$.

Эффективный КПД сварочной дуги характеризует тепловую эффективность дуги, но не полностью характеризует такую ее важную технологическую характеристику, как проплавающая способность, или технологическая эффективность, которую лучше характеризовать таким показателем, как удельная эффективная мощность на 1 А тока дуги. Примером способа, когда эффективный КПД характеризует проплавающую способность источника тепла, является электронно-лучевая сварка, поскольку разгоняющее напряжение напрямую влияет на энергию электронов.

У дуги обратной полярности показатель удельной эффективности существенно больше, чем у прямой полярности. Исходя из этого, проплавающая способность дуги обратной полярности выше, о чем свидетельствует больший предел толщин, свариваемых без разделки кромок. В этом можно убедиться по данным стандартов на сварку в среде защитных газов.

При выборе режимов дуги при VP-GTAW-сварке следует исходить из допустимых токов на вольфрамовый электрод на обратной и прямой полярностях, полученных в работе [26]. Допустимым токовым нагрузкам для разных марок электродов на прямой полярности посвящена также работа [27]. Допустимый ток на обратной полярности слабо зависит от марки электрода. При увеличении тока импульса обратной полярности по отношению к допустимому за период длительность импульса следует пропорционально уменьшать. При этом

значение тока импульса прямой полярности можно не изменять. При расчете эффективной мощности дуги с РПИ можно использовать формулы (3) и (4). По-видимому, значение отношения α можно оптимизировать с позиций максимальной эффективной мощности, если учитывать соотношение допустимых токов на вольфрамовый электрод на обратной и прямой полярностях.

Выводы

1. Удельная тепловая эффективность дуги обратной полярности снижается с уменьшением тока дуги, а прямой полярности увеличивается. В то же время в диапазоне токов 100–250 А удельная эффективность дуги обратной полярности значительно выше.

2. Эффективность дуги при сварке с РПИ в дуге с неплавящимся электродом следует оценивать по средним за период токам каждой из полярностей. Чем выше доля среднего тока обратной полярности, тем выше эффективная мощность. Однако в целом разница эффективных мощностей сравнительно невелика.

3. Установлено, что в дуге с РПИ с уменьшением тока с 250 до 100 А эффективный КПД на обратной полярности изменяется в пределах 0,65–0,68, а на прямой полярности при уменьшении тока от 200 до 150 А составляет 0,75–0,76.

4. Значения эффективного КПД дуги обратной полярности с неплавящимся электродом хорошо совпадают со значениями, полученными для сварки плавящимся электродом без учета вклада мощности каплями электродного металла.

5. На основе анализа эффективных мощностей дуг при одинаковом среднем токе 170 А предложены формулы расчета эффективной мощности для свободной дуги с РПИ, с учетом роли как приэлектродных областей дуги, так и плазменных потоков и столба дуги.

Список литературы

1. Основные тенденции развития плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов / А.А. Гринюк, В.Е. Коржик, Е.Н. Шевченко [и др.] // Автоматическая сварка. – 2015. – № 11. – С. 39–50.
2. A pathway to microstructural refinement through double pulsed gas metal arc welding / L.L. Wang, J.H. Wei, J.X. Xue, T. DebRoy // Scripta Materialia. – 2017. – Vol. 134. – P. 61–65. DOI.org/10.1016/j.scriptamat.2017.02.034
3. Kyshore Babu N., Gross C.E. Grain refinement of AZ31 magnesium alloy weldments by AC pulsing technique // Metallurgical and Materials Transactions A. – November 2012. – Vol. 43A. – P. 4145–4154. DOI: 10.1007/11661-012-1241-2
4. Савинов А.В., Лапин И.Е., Лысак В.И. Дуговая сварка неплавящимся электродом. – М.: Машиностроение, 2011. – 477 с.

5. Keyhole welding of AA2219 aluminum alloy with double-pulsed variable polarity gas tungsten arc welding / W. Yipeng, Q. Bojin, Z. Minjie, L. Sanbao // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2018. – Vol. 34. – P. 179–186. DOI.org/10.1016/j.jmapro.2018.06.006
6. Белановский А.Е. Структура катодного пятна сварочной дуги с неплавящимся электродом // *Теплофизика высоких температур*. – 2018. – Т. 56, № 1. – С. 3–13. DOI: org/ 10.7868/S0040364418010015
7. Arc attachments on aluminum during tungsten electrode positive polarity in TIG welding on aluminum / S. Rose, J. Zähr, M. Schnick, U. Füssel, S-F. Goecke, M. Hübner // *Welding in the World*. – 2012. – Vol. 55, no. 09/10. – P. 91–99.
8. Cho J., Lee J-Jae, Hwan-Bae S. Heat input analysis of variable polarity arc welding of aluminum // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2015. – Vol. 81. – P. 1273–1280. DOI 10.1007/s00170-015-7292-y
9. Белановский А.Е. Новый механизм взаимодействия сварочного дугового разряда постоянного тока обратной полярности с поверхностью алюминия // *Теплофизика высоких температур*. – 2019. – Т. 57, № 6. – С. 819–834. DOI: 10.1134/S004036441906061
10. Yarmuch M.A.R., Patched B.M. Variable AC polarity GTAW fusion behavior in 5083 aluminum / *Welding Research*. – July 2007. – Vol. 86. – P. 196–200.
11. Investigation on the influence of various welding parameters on the arc thermal efficiency of the GTAW process by calorimetric method / M.B. Nasiri, M. Behzadinejad, H. Latifi, J. Martikeinen // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2014. – Vol. 28 (8). – P. 3255–3261. DOI 10.1007/s12206-014-0736-8
12. Simulation and analysis of heat transfer and fluid flow characteristics of variably polarity GTAW process based on a tungsten-arc-specimen coupled model / J. Pan, S. Hu, L. Jang, H. Li. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2016. – Vol. 96. – P. 346–352. DOI.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.01.014 017-9310/
13. Wang Investigation of molten pool behavior and weld bead formation in VP GTAW by numerical modeling / J. Pan, S. Hu, L. Jang, D. // *Materials and Design*. – 2016. – Vol. 111. – P. 600–607. DOI.org/10.016/j.matdes.2016.09.022
14. The effect of electrode energy balance on variable polarity plasma arc pressure / B. Hu, Sh. Tashiro, F. Jang, M. Tanaka, Sh. Chen // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2019. – Vol. 145. – P. 118715. DOI.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118.715
15. Jiang F., Li Ch., Chen Sh. Experimental investigation on heat transfer of different phase in variable polarity plasma arc welding // *Welding in the World*. – 2019. – Vol. 63. – P. 1153–1162. DOI.org/10.1007/S40194-019-00722-3
16. Цицын Д.Ю., Косолапов О.А., Струков Н.Н. Распределение энергии в сжатой дуге при работе плазматрона на токе обратной полярности // *Сварка и Диагностика*. – 2010. – № 3. – С. 13–16.
17. Jeong H., Park K., Cho J. Numerical analysis of variable polarity arc weld pool // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2016. – Vol. 30 (9). – P. 4307–4313. DOI 10.1007/s12206-016-0845-7
18. Thermal efficiency decision of variable polarity aluminum arc welding through molten pool analysis / H. Jeong, K. Park, S. Bajek, J. Cho // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2019. – Vol. 138. – P. 729–737.
19. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. – М.: Высшая школа, 1988. – 239 с.
20. 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
21. 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. DOI:10.1823/2073-5073-2019-4-52-57
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.
23. Эффективная мощность сварочной дуги обратной полярности при наплавке алюминия плавящимся электродом / В.П. Сидоров, А.И. Ковтунов, А.Г. Бочкарев, Д.Э. Советкин // *Вектор науки ТГУ*. – 2020. – № 4 (в печати). DOI:10.18323/2073-5073-2020-4-00-00
24. Сидоров В.П. Влияние рода и полярности тока на плавление основного и электродного металла при сварке под флюсом // *Сварка и Диагностика*. – 2013. – № 3. – С. 20–23.
25. Короткова Г.М. Источники питания переменного тока для сварки неплавящимся электродом алюминиевых сплавов / ТГУ. – Тольятти, 2009. – 335 с.
26. 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 и материаловедение*. – 2020. – № 4. – С. 5–12.
27. Пономарев К.Е., Стрельников И.В. К вопросу выбора марки вольфрамовых электродов для сварки (обзор) // *Сварка и Диагностика*. – 2019. – № 1. – С. 32–37.

References

1. Griniuk A.A., Korzhik V.E., Shevchenko E.N. et al. Osnovnye tendentsii razvitiia plazmenno-dugovoi svarki aluminievykh splavov [Main trends in the development of plasma arc welding of aluminum alloys]. *Avtomaticheskaia svarka*, 2015, no. 11, pp. 39 – 50.
2. Wang L.L., Wei J.H., Xue J.X., DebRoy T. A pathway to microstructural refinement through double pulsed gas metal arc welding. *Scripta Materialia*, 2017(134), p. 61-65 <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.02.034>
3. Kyshore Babu N., Gross C.E. Grain Refinement of AZ31 Magnesium Alloy Weldments by AC Pulsing Technique. *Metallurgical and Materials Transactions A.*, 2012, vol. 43A, p.4145-4154. doi: 10.1007/11661-012-1241-2
4. Savinov A.V., Lapin I.E., Lysak V.I. Dugovaia svarka neplaviashchimsia elektrodom [Arc welding with non-consumable electrode]. Moscow: Mashinostroenie, 2011. 477 p.
5. Yipeng W., Bojin Q., Minjie Z., Sanbao L. Keyhole welding of AA2219 aluminum alloy with double-pulsed variable polarity gas tungsten arc welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, vol. 34, pp. 179-186. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.06.006>
6. Belanovskii A.E. Struktura katodnogo piatna svarochnoi dugi s neplaviashchimsia elektrodom [Structure of the cathode spot of the welding arc with a non-

- consumable electrode]. *Teplofizika vysokikh temperature*, 2018, vol. 56, no. 1, pp. 3-13. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0040364418010015>
7. Rose S., Zähr J., Schnick M., Füssel U., Goecke S-F., Hübner M. Arc attachments on aluminum during tungsten electrode positive polarity in TIG welding on aluminum. *Welding in the World*, 2012, no. 09/10, vol. 55, pp. 91-99.
8. Cho J., Lee J-Jae, Hwan-Bae S. Heat input analysis of variable polarity arc welding of aluminum. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, no. 81: 1273-1280 DOI 10.1007/s00170-015-7292-y
9. Belanovskii A.E. Novyi mekhanizm vzaimodeistviia svarochnogo dugovogo razriada postoiannogo toka obratnoi poliarnosti s poverkhnost'iu aliuminiia [A New Mechanism of Interaction of DC Electric Arc Discharge in Reverse Polarity with Aluminum Surface]. *Teplofizika vysokikh temperature*, 2019, vol. 57, no. 6, pp. 819-834. DOI: 10.1134/S004036441906061
10. Yarmuch M.A. R., Patched B.M. Variable AC Polarity GTAW Fusion Behavior in 5083 Aluminum. *Welding Research*, 2007, vol. 86, pp. 196-200.
11. Nasiri M.B., Behzadinejad M., Latifi H., Martikeinen J. Investigation on the influence of various welding parameters on the arc thermal efficiency of the GTAW process by calorimetric method. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, no. 28 (8), pp. 3255-3261. DOI 10.1007/s12206-014-0736-8
12. Pan J., Hu S., Jang L., Li H. Simulation and analysis of heat transfer and fluid flow characteristics of variably polarity GTAW process based on a tungsten-arc-specimen coupled model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, vol. 96, pp. 346-352. DOI.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.01.014 017-9310/
13. Pan J., Hu S., Jang L., Wang D. Investigation of molten pool behavior and weld bead formation in VP GTAW by numerical modelling. *Materials and Design*, 2016, vol. 11, pp. 600–607. DOI.org/10.016/j.matdes.2016.09.022
14. Hu B., Tashiro Sh., Jang F., Tanaka M., Chen Sh. The effect of electrode energy balance on variable polarity plasma arc pressure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 145, p. 118715. DOI.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118.715
15. Jiang F., Li Ch., Chen Sh. Experimental investigation on heat transfer of different phase in variable polarity plasma arc welding. *Welding in the World*, 2019, vol. 63, pp. 1153-1162. DOI.org/10.1007/s40194-019-00722-3
16. Shchitsyn D.Iu., Kosolapov O.A., Strukov N.N. Raspreделение energii v szhatoi duge pri rabote plazmotrona na toke obratnoi poliarnosti [Energy distribution in the compressed arc when the plasma torch is operated with reverse polarity current]. *Svarka i Diagnostika*, 2010, no. 3, pp.13-16.
17. Jeong H., Park K., Cho J. Numerical analysis of variable polarity arc weld pool. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, vol. 30, no. 9, pp. 4307-4313. DOI 10.1007/s12206-016-0845-7.
18. Jeong H., Park K., Bajek S., Cho J. Thermal efficiency decision of variable polarity aluminum arc welding through molten pool analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 138, pp. 729– 737.
19. L'vovskii E.N. Statisticheskie metody postroeniia empiricheskikh formul [Statistical methods of constructing empirical formulas]. Moscow: Vysshiaia shkola, 1988, 239 p.
20. 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. <http://doi.org/10.1007/s00170-017-1387-6>
21. Sidorov V.P., Sovetkin D.E., Borisov N.A. O plavlenii aliuminievogo elektroda argonovoi dugoi priamoj poliarnosti [On the melting of an aluminum electrode with a direct-polarity argon arc]. *Vektor nauki TGU*, 2019, no. 4(50), pp. 52–57. Doi:10.1823/2073-5073-2019-4-52-57
22. Sidorov V.P., Sovetkin D.E. Vliianie balansa poliarnosti na effektivnuiu moshchnost' dugi pri tochechnoi plazmennoi svarke aliuminievyykh splavov [Effect of Polarity Balance on Effective Arc Power in Spot Plasma Welding of Aluminum Alloys]. *Vestnik RGUPS*, 2019, no. 4, pp. 23-26.
23. Sidorov V.P., Kovtunov A.I., Bochkarev A.G., Sovetkin D.E. Effektivnaia moshchnost' svarochnoi dugi obratnoi poliarnosti pri naplavke aliuminiia plaviashchimsia elektrodom [Effective power of the reverse polarity welding arc when cladding aluminum with a fusing electrode]. *Vektor nauki TGU*, 2020, no. 4. DOI:10.18323/2073-5073-2020-4-00-00
24. Sidorov V.P. Vliianie roda i poliarnosti toka na plavlenie osnovnogo i elektrodnoogo metalla pri svarke pod flusom [Effect of type and polarity of current on the melting of base and electrode metal in submerged arc welding]. *Svarka i Diagnostika*, 2013, no. 3, pp. 20-23.
25. Korotkova G.M. Istochniki pitaniia peremennogo toka dlia svarki neplaviashchimsia elektrodom aliuminievyykh splavov [AC power sources for non-consumable electrode welding of aluminum alloys]. *Tol'iaty, TGU*, 2009, 335 p.
26. Sidorov V.P., Sovetkin D.E., Korotkova G.M. O dopustimyykh tokakh na vol'framovykh elektrodakh dugi s raznopol'iarnymi impul'sami toka [On allowable currents on the tungsten arc electrode with multipolar current pulses]. *Vestnik PNIPIU*, 2020, pp. 5-12.
27. Ponomarev K.E., Strel'nikov I.V. K voprosu vybora marki vol'framovykh elektrodov dlia svarki [Regarding the choice of tungsten electrodes for welding]. *Svarka i Diagnostika*, 2019, no. 1, pp. 32-37.

Принято 07.12.2020

Опубликовано 29.03.2021

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.

About the authors

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

Dmitry E. Sovetkin (Togliatti, Russian Federation) – Master of Science, Senior Lecturer, Department of Welding, Metal Forming and Associated Processes, Togliatti State University, e-mail: mitya.sovetkin@yandex.ru.