

Сидоров В.П., Советкин Д.Э. Эффективная мощность полярностей в свободной дуге с разнополярными импульсами тока // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 13–19. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.2.02

Sidorov V.P., Sovetkin D.E. Effective power of polarities in non-constricted arc with variable current pulses. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 13–19. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.2.02

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 23, № 2, 2021

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

DOI: 10.15593/2224-9877/2021.2.02
УДК 621.791.75

В.П. Сидоров, Д.Э. Советкин

Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия

ЭФФЕКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ ПОЛЯРНОСТЕЙ В СВОБОДНОЙ ДУГЕ
С РАЗНОПОЛЯРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ТОКА

Выполнен обзор исследований эффективного КПД дуг с неплавящимся и плавящимся электродами в среде аргона на изделиях из различных металлов. Значения эффективного КПД имеют существенный разброс. Установлено, что в таких условиях наименее исследовано действие стационарной во времени дуги на алюминиевые детали. Эффективный КПД в большинстве работ приводится без значений напряжения дуги, что затрудняет его использование в инженерной практике. Наиболее целесообразным с позиций тепловой эффективности при сварке является использование понятия удельной эффективной мощности на 1 А тока дуги. Перспективным способом сварки алюминиевых сплавов в настоящее время является сварка вольфрамовым электродом в аргоне с использованием разнополярных прямоугольных импульсов тока (способ VP-GTAW). Разработанные численные математические модели для этого способа сварки дали противоречивые результаты. Вклад полярностей дуги в общую эффективную мощность исследован недостаточно. Это затрудняет выбор оптимальных соотношений значений длительности полярности в периоде. Для определения роли полярностей разработана методика калориметрирования алюминиевых деталей на одинаковых токах импульсов при различном соотношении длительности импульсов прямой и обратной полярностей. Проведенные эксперименты позволили составить системы уравнений для общей эффективной мощности дуги. Решение систем уравнений дало высокую сходимость данных по удельной эффективной мощности полярностей. При токе около 100 А удельная эффективная мощность на обратной полярности почти в 2 раза выше, чем на прямой полярности. Этот результат согласуется с данными о соотношении значений скорости плавления алюминиевой проволоки при наплавке плавящимся электродом.

Ключевые слова: сварка алюминия, свободная дуга, вольфрамовый электрод, аргон, разнополярные импульсы, эффективная мощность, эффективный КПД, вклад полярностей, калориметрирование, система уравнений, VP-GTAW.

V.P. Sidorov, D.E. Sovetkin

Togliatti State University, Togliatti, Russian Federation

EFFECTIVE POWER OF POLARITIES IN NON-CONSTRICTED ARC
WITH VARIABLE CURRENT PULSES

The basis for this research was a review of papers related to the effective efficiency of non-consumable and consumable electrode arc welding of various metal products in argon. The result shows that the variation of effective efficiency values is essential. It was found that the stable arc effect on aluminum parts is the least understood. In most works, the effective efficiency is given without arc voltage values that complicate its use in practical engineering. The most preferred concept from the point of welding thermal efficiency is the specific effective power per 1 A of the arc current. Nowadays, the most promising method of aluminum alloy welding is Tungsten Inert Gas Welding (TIG) with the application of variable square wave current pulses (VP-GTAW). Numerical mathematical models developed for this welding method show contradicting results. The contribution of arc polarities to the total effective power is not well studied. This makes it difficult to choose optimal ratios for polarity duration and a period. To determine the role of polarities, we apply the method of aluminum parts calorimetry at the same pulse current and different ratios of the pulse duration of straight and reverse polarities. The experiments made it possible to compose several systems of equations for the total arc effective power. Equations solving showed high convergence of data on the specific effective power of polarities. If the current is about 100 A, the specific effective power of the reverse polarity arc is about twice higher when compared to the straight polarity arc. This result accord with data on the ratio of aluminum wire fusion rate at consumable electrode hardfacing.

Keywords: aluminum welding, non-constricted arc, tungsten electrode, argon, variable pulses, effective power, effective efficiency, polarity contribution, calorimetry, system of equations, VP-GTAW.

Введение

Благодаря универсальности в отношении сварки сталей покрытыми электродами и в аргоне вольфрамовым электродом на постоянном токе,

а также очистке алюминиевого катода в дуге с импульсами тока прямоугольной формы, установки с разнополярными импульсами тока находят все большее применение [1]. Процесс дуговой сварки с переменной полярностью VP-GTAW имеет значи-

тельную перспективу в отношении сварки алюминиевых сплавов средней толщины. Однако в VP-GTAW постоянная смена полярности тока между отрицательным (EN) и положительным (EP) электродами может вызывать колебания тепловой мощности и силового воздействия дуги во время сварки, что затрудняет контроль стабильности VP-GTAW [2]. Актуальным по-прежнему является определение общей тепловой эффективности дуги VP-GTAW в зависимости от соотношения значений полярности и тока импульсов. Кроме того, необходим выбор оптимальных значений тока нагрузки для обеспечения длительной стойкости вольфрамовых электродов и качественной очистки поверхности алюминия [3]. Ввиду этого исследование различий теплопередачи и ее эффективности в дуге переменной полярности важно для выбора оптимальных характеристик теплопередачи и обеспечения стабильности процесса сварки.

По-видимому, процессы на плавящихся катодах-изделиях во многом подобны, несмотря на разницу в значениях температуры их плавления, так как значения температуры кипения таких металлов, как железо, алюминий, медь, достаточно близки [4]. Исходя из этого, результаты определения эффективной мощности на изделиях из разных металлов при сварке плавящимся электродом также представляют интерес для определения значений мощности в VP-GTAW.

В работе [5] сравнивались значения эффективной мощности свободной и сжатой дуги и установлено, что эффективный КПД η свободной дуги выше, чем сжатой, из-за дополнительных потерь энергии в канале плазматрона.

В работе [6] приведены данные об эффективном КПД дуги с плавящимся электродом при сварке алюминия. Минимальное значение – $\eta = 73\%$, максимальное – $\eta = 91\%$, размах варьирования $\Delta\eta = 18\%$. Следовательно, среднее значение η можно оценить как $\eta = (82 \pm 9)\%$. Данные работы [6] хорошо совпадают с результатами, полученными в источнике [7]. В работе [8] также определено значение эффективного КПД – $\eta = 81\%$ – на токе 200 А при мелкокапельном переносе электродного металла. При этом установлен вклад электродного металла в полную эффективную мощность и оценена составляющая мощности, передаваемая детали потоками плазмы.

В работе [9] исследовалось проплавление пластины из сплава Al–Mg 5083 толщиной 10 мм при скорости сварки 0,8 мм/с способом VP-PAW. Ток сварки составлял 125 А, погонная энергия дуги 1300 Дж/мм. Отсюда следует, что эффективная мощность дуги была порядка $q = 1040$ Вт, а удель-

ная эффективная мощность на 1 А тока $q_1 = 8,32$ Вт/А. Длина дуги поддерживалась 2 мм, расход защитного аргона составлял 30 л/мин. Использовался вольфрамовый электрод диаметром 3,2 мм. Доля времени импульсов обратной полярности EP изменялась от 20 до 70 % периода при частоте импульсов 60 Гц. Таким образом, минимальный средний за период ток импульса EP составлял 25 А, а максимальный 87,5 А. Последний ток весьма значителен для неплавящегося электрода такого диаметра.

Глубина проплавления линейно увеличивалась с увеличением длительности EP с 0,2 до 1,2 мм при существенном разбросе ее значений. Аналогичная зависимость получена для ширины шва. Было установлено, что увеличение частоты импульсов до 240 Гц не приводит к существенному изменению размеров шва.

В работе [10] эффективный КПД дуги VP-GTAW при действии дуги на сплавы алюминия исследовался калориметрическим методом. При диаметре электрода 2 мм зависимость от длительности обратной полярности имеет минимум $\eta = 52\%$. При значениях диаметра 3 и 4 мм для тока 250 А наблюдалось только снижение η . Интересное явление было обнаружено при увеличении длительности EP выше 6,25 мс, которое приводило к оплавлению остро заточенного электрода. Эффективный КПД при этом резко снижался с 58 до 52 %. При постоянном значении времени EP эффективный КПД снижался с увеличением тока дуги. Следует отметить, что данные по КПД дуги сложно использовать в инженерной практике, так как необходима и информация о напряжении дуги.

В работах [11, 12] приведены данные обзора 27 работ по калориметрированию дуг с неплавящимся электродом, выполненных с 1955 по 2011 г. Из них к алюминиевой детали относятся данные только трех работ. КПД для полярности EN определен в диапазоне 76–89 %, т.е. несколько выше, чем для сталей. КПД полярности EP существенно меньше – $\eta = 52...63\%$. Для дуги переменного тока $\eta = 65...83\%$, что намного выше, чем было получено в первых исследованиях. Данные по эффективности полярности EP на стальной детали в работах [11, 12] отсутствуют.

В работе [13] наряду с исследованием эффективного КПД дуги прямой полярности были получены и данные для дуги обратной полярности на низкоуглеродистой стали при малых значениях тока в диапазоне 30–60 А. Небольшие значения исследованных токов объясняются низкой стойкостью вольфрамового электрода. Эффективный КПД дуги обратной полярности авторы работы [13] оценили

в $(52 \pm 4) \%$. При этом напряжение дуги составляло 23 В и расчет удельной эффективной мощности на 1 А тока дает нам значение $q_1 = (12 \pm 4) \text{ Вт/А}$. Аналогичный показатель для дуги прямой полярности в диапазоне значений тока 140–180 А составляет, согласно данным работы [13], $q_1 = 8,7 \text{ Вт/А}$. 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.

В работе [14] разработана численная математическая модель процесса сварки алюминиевых сплавов дугой VP-GTAW, с помощью которой была оценена относительная тепловая эффективность полярностей при их совместном действии при сварке. Сила тока импульсов была равна 150 А, напряжение дуги принималось усредненным 16 В. Расчеты выполняли для трех значений относительной длительности полярности EP в периоде $\alpha = 0,15 \dots 0,45$. КПД дуги прямой полярности принимался $\eta_{EN} = 70 \%$, 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 [15] численное моделирование дуги VP-GTAW использовалось для оценки эффективности проплавления алюминиевого сплава AA1060. 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 $\eta_{EN} = \eta_{EP} = 72 \%$, что не вполне корректно, так как, по данным работ [11–13], КПД дуги обратной полярности $\eta_{EP} \approx 50 \%$. Фиксировались средние значения тока и напряжения дуг в импульсах. Полученные значения эффективной мощности импульсов использовали при численном моделировании размеров сварочной ванны. По итогам моделирования, как и на экспериментальных шлифах, было обнаружено, что ширина шва с обратной стороны пластин иногда больше, чем его ширина в ее срединной области. Такое явление авторы объяснили действием эффекта Марангони, который учитывался в разработанной мо-

дели. Сходимость расчетных и опытных размеров шва в работе [15] хорошая, однако на фотографии лицевой стороны шва при $\alpha = 30 \%$ видно существенное изменение ширины шва по его длине.

В работе [16] при численном моделировании значения баланса полярностей принимали четыре значения α от 0,15 до 0,45 с шагом 0,1. Сила тока импульсов была более значительной – $I = 280 \text{ А}$. Эффективный КПД на прямой полярности принимали $\eta_{EN} = 25 \%$, а на обратной полярности задавали пять значений от $\eta_{EP} = 55 \%$ до $\eta_{EP} = 95 \%$ с шагом 10 %. 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) [17] 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 работ [11–13], использованные значения КПД и в этом случае не отвечают наблюдавшимся экспериментально.

Для оценки приэлектродной мощности катода на алюминии можно использовать данные работ по плазменной сварке на обратной полярности [18, 19], однако в этом случае необходима методика учета мощности, передаваемой изделию плазмообразующим газом.

Вольфрамовый электрод сильно нагревается в стадии EP, поэтому трудно измерить тепловые характеристики именно этой стадии. Следовательно, необходимо измерение и расчет тепловых характеристик одной фазы в течение всего периода. В работе [2] была применена методика проточного калориметрирования медного анода при регулировании длительности и токов обеих полярностей. В результате решения систем уравнений были получены значения эффективной мощности и эффективного КПД от токов импульсов.

Целью данной работы было на основании подхода, примененного в работе [2] при действии сжатой дуги VP-PAW на медную деталь, разработать методику дифференцирования удельной эффективной мощности полярностей свободной дуги VP-GTAW при действии на алюминиевую деталь.

Методика исследований

Сущность методики заключалась в калориметрировании алюминиевых образцов при различных значениях длительности полярностей EN и EP. Методика калориметрирования отличалась от ме-

тодики, изложенной в работе [8], тем, что учитывались потери энергии образцами во время наплавки и переноса образца в калориметр, а также потери калориметром на теплоотдачу во время перемешивания воды. Для определения коэффициентов поверхностной теплоотдачи от пластины и калориметра предварительно были выполнены специальные эксперименты. Суммарно обе поправки не превышали 1,5 % от эффективной энергии наплавки.

Для наплавки использовался источник питания BRIMA TIG 200P AC/DC. В качестве заготовки использовались пластины из сплава АМц толщиной 4 мм размером 100×50×4 мм. Для наплавки неподвижной дугой использовалась сварочная горелка с электродом марки WT-20 диаметром 3 мм. Торец электрода оставался плоским. В качестве защитного газа служил аргон марки А. Вылет вольфрамового электрода из цанги составлял 15 мм, из сопла – 6 мм. Расстояние от торца электрода до пластины устанавливался 1,9 мм. Расход аргона во всех опытах был постоянным – 8 л/мин и измерялся ротаметром. Диаметр выходного сечения сопла горелки составлял 12 мм.

Время наплавки и переноса образца и время перемешивания фиксировалось посредством видеосъемки со скоростью 120 кадров в секунду. Точки импульсов обеих полярностей от источника питания в наших опытах были одинаковыми. Время наплавки составляло около 15 с и точно определялось по данным видеосъемки. В одной серии опытов при токе дуги 98 А использовали три значения баланса полярностей. На каждом балансе повторяли три опыта. Затем рассчитывали удельную эффективную мощность на 1 А тока q_1 и среднее алгебраическое отклонение (САО) q_1 по данным трех опытов от среднего значения.

Результаты и их обсуждение

Для двух серий опытов на разных балансах можно записать следующую систему уравнений для полных удельных эффективных мощностей:

$$q_{11} = q_{1EN} \Omega_1 + q_{1EP} (1 - \Omega_1), \quad (1)$$

$$q_{12} = q_{1EN} \Omega_2 + q_{1EP} (1 - \Omega_2), \quad (2)$$

где q_{1EN}, q_{1EP} – удельная эффективная мощность дуги в процессе действия импульсов прямой и обратной полярностей соответственно, Вт/А; Ω_1, Ω_2 – относительная длительность в периоде импульсов прямой полярности в первой и второй сериях опытов.

Таким образом, для серии из трех балансов полярностей можно составить три пары уравнений, подобных уравнениям (1) и (2), получить по ним значения q_{1EN}, q_{1EP} и усреднить их. Разброс полу-

ченных данных будет свидетельствовать об адекватности их результатов (табл. 1).

Таблица 1

Значения удельной эффективности дуги при различной относительной длительности EN

Номер серии	Ω EN	q_1 , Вт/А	САО, %
1	0,90	6,33	0,9
2	0,75	7,12	4,3
3	0,60	7,96	2,3

Среднее значение САО для трех серий опытов составляет 2,5 %, в то время как относительный размах значений q_1 составляет ±11,4 %. Это показывает, что точность калориметрирования достаточна для дифференциации значений удельной эффективной мощности полярностей. Как видно из табл. 1, удельная эффективность дуги растет с увеличением доли обратной полярности. Для повышения точности определения зависимостей q_{EN} и q_{EP} от баланса полярностей значения q_1 из табл. 1 аппроксимировали линейной функцией по методу наименьших квадратов с помощью стандартной компьютерной программы [20]. В результате получили формулу для q_1 , Вт/А:

$$q_1 = 5,79 + 5,43(1 - \Omega). \quad (3)$$

САО расчетных значений q_1 по формуле (3) по отношению к данным табл. 1 всего 0,23 %.

Для расчета значений q_{EN} и q_{EP} с помощью уравнений (1) и (2) использовали расчетные значения по формуле (3). Результаты расчета сведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные значения удельной эффективной мощности полярностей

Система для серии	1, 2	2, 3	1–3	Среднее значение	САО, %
EN, Вт/А	5,78	5,9	5,78	5,82	0,91
EP, Вт/А	13,61	11,03	11,21	11,95	9,23

Получили, что САО средней удельной эффективности прямой полярности почти в 10 раз меньше, чем обратной полярности. Это позволяет расчетным путем определять вклад прямой полярности в опытах по определению влияния баланса полярностей. Среднее значение удельной эффективной мощности обратной полярности почти в 2 раза выше. Это согласуется с данными работы [21], в которой получено, что скорость расплавления алюминиевой электродной проволоки в 2,2 раза больше на прямой полярности, чем на обратной. В работе [22] на примере автоматической сварки под флюсом от источника питания

с разнополярными импульсами тока показано, что проплавляющая способность дуги определяется главным образом мощностью ее приэлектродной области на изделии. В удельную эффективную мощность полярностей существенный вклад вносит мощность от плазменного потока от столба дуги к изделию. Ввиду этого важной является оценка мощности таких потоков, выполненная для дуги обратной полярности в работе [8] на основе изучения эффективной мощности при наплавке плавящимся электродом.

Методику, учитывающую высокую точность определения q_{EN} , дополнительно проверяли в другой серии экспериментов, когда время горения дуги составляло около 10 с, а ток дуги 74 А. Снижение тока дуги позволило увеличить длительность импульсов с преобладанием обратной полярности. Расчеты показали хорошую среднюю сходимость значения $q_{EP} = 10,86$ Вт/А для значений длительности EP 0,75 и 0,60 от периода. Для значения длительности EP 0,90 периода методика дает существенно завышенные результаты. Это объясняется резким снижением мощности обратной полярности из-за оплавления электрода. Ввиду этого для данных трех серий экспериментов из табл. 1 целесообразно исключить системы уравнений серий 1–3 и ориентироваться на решение системы для серий 2–3. В результате можно рекомендовать значения удельной эффективной мощности $q_{EN} = 5,9$ Вт/А и $q_{EP} = 11,0$ Вт/А.

При выполнении экспериментов на токе 74 А при переходе на режим EN/EP = 10...90 % вольфрамовый электрод оплавился и его торец принял форму полусферы. В следующем опыте электрод оплавился еще больше, его длина уменьшилась, а удельная эффективная мощность дуги снизилась с 10,5 до 9,25 Вт/А. Подобное явление описано в работе [10] при использовании остро заточенного электрода диаметром 3 мм. На токе 180 А оплавление произошло при длительности импульса $t_{EP} = 6,25$ с. При частоте импульсов 50 Гц это дает значение среднего тока полярности EP $I_{EP} = 56$ А. В нашем случае среднее значение тока еще больше – $I_{EP} = 67$ А. При среднем токе $I_{EP} = 44$ А электрод в наших опытах еще сохранял плоскую форму. Полученные значения среднего тока, при котором оплавляется электрод, могут быть использованы для проверки математической модели распространения тепла в неплавящемся электроде.

Выводы

1. Разработанная методика разделения значений удельной эффективной мощности полярностей дуги VP-GTAW при равных импульсах тока по-

средством калориметрирования полной эффективной мощности обеспечивает точность, аналогичную точности измерения полной электрической мощности дуги, а именно ± 2 %.

2. Использование методики на токе около 100 А показало, что удельная эффективная мощность положительного алюминиевого изделия – анода – составляет 5,9 Вт/А, а отрицательного катода – 11,0 Вт/А. Это объясняет повышенную проплавляющую способность дуг обратной полярности при сварке плавящимся электродом и согласуется с высокой производительностью расплавления алюминиевой электродной проволоки при сварке на прямой полярности плавящимся электродом.

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. 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: 10.1007/s40194-019-00722-3
3. 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. – 2020. – № 4. – С. 5–12.
4. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.
5. Feueschbach P.V., Knorovsky G.A. A study of melting efficiency in plasma arc and gas tungsten arc welding // Welding Journal. – 1991. – Vol. 70 (11). – P. 287–297.
6. Haelsig A., Kusch M., Mayr P. New findings on the efficiency of gas shielded arc welding // Welding in the World. Peer-reviewed Section. – 2012. – Vol. 56. – P. 98–104.
7. Dupont J.N., Marder A.R. Thermal efficiency of arc welding processes // Welding Journal. – 1995. – Vol. 74 (12). – P. 410–416.
8. Эффективная мощность сварочной дуги обратной полярности при наплавке алюминия плавящимся электродом / В.П. Сидоров, А.И. Ковтунов, А.Бочкарев, Д.Э. Советкин // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2020. – № 4 (54). – С. 34–42. DOI: 10.18323/2073-5073-2020-4-00-00
9. 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.
10. Савинов А.В., Лапин И.Е., Лысак В.И. Дуговая сварка неплавящимся электродом. – М.: Машиностроение, 2011. – 477 с.
11. Stenbacka N. On arc efficiency in gas tungsten arc welding // Soldag. Insp. San Paulo. – 2013. – Vol. 18, no. 4. – P. 380–390.
12. Stenbacka N. Review of arc efficiency for tungsten arc welding // IIW Commission IV-XII-SG212 Intermediate

Meeting BAM, Berlin, Germany, 18–20 April, 2012. – Berlin, Germany, 2012. DOI: XII-2070-12/212-1229-12

13. 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

14. 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

15. 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.

16. 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: 10.1007/s00170-017-1387-6

17. Драйнер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. – М.: Диалектика, 2016. – 912 с.

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

19. Щицын Д.Ю., Косолапов О.А., Струков Н.Н. Распределение энергии в сжатой дуге при работе плазмотрона на токе обратной полярности // *Сварка и диагностика*. – 2010. – № 3. – С. 13–16.

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

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

22. 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.

References

1. Griniuk A.A., Korzhik V.E., Shevchenko E.N. et al. Osnovnye tendentsii razvitiia plazmenno-dugovoi svarki aliuminievykh spлавov [Main trends in the development of plasma arc welding of aluminum alloys]. *Avtomaticheskaiя svarka*, 2015, no. 11, pp. 39–50.

2. 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: 10.1007/s40194-019-00722-3

3. Sidorov V.P., Sovetkin D.E., Korotkova G.M. O dopustimyykh tokakh na vol'framovyi elektrod dugi s raznopol'iarnymi impul'sami toka [On allowable currents on the tungsten arc electrode with multipolar current pulses]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta*, 2020, no. 4, pp. 5–12.

4. Zinov'ev V.E. Teplofizicheskie svoistva metallov pri vysokikh temperaturakh [Thermophysical properties of metals at high temperatures]. Moscow: Metallurgiya, 1989, 384 p.

5. Feueschbach P.V., Knorovsky G.A. A study of melting efficiency in plasma arc and gas tungsten arc welding. *Welding Journal*, 1991, vol. 70 (11), pp. 287–297.

6. Haelsig A., Kusch M., Mayr P. New findings on the efficiency of gas shielded arc welding. *Welding in the World. Peer-reviewed Section*, 2012, vol. 56, pp. 98–104.

7. Dupont J.N., Marder A.R. Thermal efficiency of arc welding processes. *Welding Journal*, 1995, vol. 74 (12), pp. 410–416.

8. Sidorov V.P., Kovtunov A.I., Bochkarev A., Sovetkin D.E. Effektivnaia moshchnost' svarochnoi dugi obratnoi poliarnosti pri naplavke aliuminiia plaviashchimsia elektrodom [Effective power of reverse polarity welding arc when surfacing aluminum with a fusing electrode]. *Vektor nauki Tol'iattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, no. 4 (54), pp. 34–42. DOI: 10.18323/2073-5073-2020-4-00-00

9. Yarmuch M.A.R., Patched B.M. Variable AC polarity GTAW fusion behavior in 5083 aluminum. *Welding Research*, 2007, vol. 86, pp. 196–200.

10. Savinov A.V., Lapin I.E., Lysak V.I. Dugovaia svarka neplaviashchimsia elektrodom [Arc welding with non-consumable electrode]. Moscow: Mashinostroenie, 2011, 477 p.

11. Stenbacka N. On arc efficiency in gas tungsten arc welding. *Soldag. Insp. San Paulo.*, 2013, vol. 18, no. 4, pp. 380–390.

12. Stenbacka N. Review of arc efficiency for tungsten arc welding. *IIV Commission IV-XII-SG212 Intermediate Meeting BAM, Berlin, Germany, 18–20 April*, 2012. Berlin, Germany, 2012. DOI: XII-2070-12/212-1229-12

13. 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, vol. 28 (8), pp. 3255–3261. DOI: 10.1007/s12206-014-0736-8

14. Jeong H., Park K., Cho J. Numerical analysis of variable polarity arc weld pool. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, vol. 30 (9), pp. 4307–4313. DOI: 10.1007/s12206-016-0845-7

15. 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.

16. 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, pp. 2421–2428. DOI: 10.1007/s00170-017-1387-6

17. Drainer N., Smit G. Prikladnoi regressiionnyi analiz [Applied regression analysis]. Moscow: Dialektika, 2016, 912 p.

18. Bykhovskii D.G., Beliaev V.M. Energeticheskie kharakteristiki plazmennoi dugi pri svarke na obratnoi poliarnosti [Energy characteristics of the plasma arc during reverse polarity welding]. *Avtomaticheskaiя svarka*, 1971, no. 5, pp. 27–30.

19. Shchitsyn D.Iu., Kosolapov O.A., Strukov N.N. Raspredelenie energii v szhatoi duge pri rabote plazmotrona na toke obratnoi poliarnosti [Energy distribu-

tion in the compressed arc when the plasma torch is operated with reverse polarity current]. *Svarka i diagnostika*, 2010, no. 3, pp. 13–16.

20. D'iakonov V.P. Spravochnik po algoritmam i programmam na iazyke beisik dlia personal'nykh EVM [Handbook on algorithms and BASIC programs for personal computers]. Moscow: Nauka, 1987, 240 p.

21. Sidorov V.P., Sovetkin D.E., Borisov N.A. O plavlenii aluminievogo elektroda argonovoi dugoi priamoi poliarnosti [On the melting of an aluminum electrode with a direct-polarity argon arc]. *Vektor nauki Tol'iattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, no. 4(50), pp. 52–57.

22. Sidorov V.P. Vliianie roda i poliarnosti toka na plavlenie osnovnogo i elektrodnogo 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.

Получено 11.04.2021

Опубликовано 25.06.2021

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.