

## О ПЛАВЛЕНИИ АЛЮМИНИЕВОГО ЭЛЕКТРОДА АРГОНОВОЙ ДУГОЙ ПРЯМОЙ ПОЛЯРНОСТИ

© 2019

**В.П. Сидоров**, доктор технических наук, профессор,

профессор кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

**Д.Э. Советкин**, преподаватель кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»**Н.А. Борисов**, студент*Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)*

**Ключевые слова:** сварочная дуга; плавящийся электрод; алюминий; прямая полярность; стабильность расплавления; сварка в защитных газах.

**Аннотация:** Проанализирована информация о соотношении скоростей плавления электродной проволоки на прямой и обратной полярностях сварочной дуги в  $\text{CO}_2$ . При равных токах скорость плавления на прямой полярности дуги примерно в 2 раза превышает скорость плавления на обратной полярности. Причиной отказа от использования прямой полярности дуги при сварке в защитных газах является низкая стабильность скорости расплавления электродной проволоки. Она вызвана интенсивными перемещениями катодного пятна дуги вследствие изменения эмиссионных свойств поверхности электрода. Предложена методика расчета мощности дуги, передаваемой в плавящийся алюминиевый электрод на разных полярностях. Расчетная удельная мощность (на 1 А тока) значительно больше для электрода-катода и повышается с ростом тока более интенсивно, чем для анода. Экспериментально определена скорость расплавления алюминиевой электродной проволоки диаметром 1,2 мм при прямой полярности дуги в аргоне. Она выше, чем при обратной полярности, также примерно в 2 раза. В пределах токов 80–180 А на прямой полярности дуги не обнаружено значимой зависимости коэффициента расплавления алюминиевой проволоки диаметром 1,2 мм от тока дуги. Расчетная методика обеспечивает удовлетворительную сходимость расчетных и опытных данных по соотношению скоростей плавления электрода на разных полярностях. Полученные формулы позволяют оценивать и эффективную мощность дуги в аргоне для алюминиевых изделий. Дальнейшие исследования планируется направить на определение условий стабильной скорости расплавления электродной проволоки на прямой полярности дуги в защитных газах. Это особенно необходимо при сварке деталей большой толщины для более производительного заполнения разделки кромок.

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что при дуговой сварке преимущественно используется обратная полярность дуги или дуга переменного тока. При ручной сварке на прямой полярности применяют специальные покрытые электроды [1]. В нормах на строительство трубопроводов ВСН 006-89 рекомендуют сварку под флюсом на прямой полярности только при токах свыше 500 А. В этом случае обеспечивается более высокая производительность расплавления, эквивалентная увеличению тока на 100 А на обратной полярности, для которой характерно более высокое проплавление основного металла [2]. Такие соотношения имеют место несмотря на то, что эффективная мощность дуги при использовании близких по составу электродов и основного металла не зависит от полярности [3]. В работе [2] более низкая проплавляющая способность дуги под флюсом прямой полярности объясняется большей толщиной жидкой прослойки в сварочной ванне в связи с более высокой скоростью расплавления электродной проволоки. В работе [4] показано,

что скорость расплавления покрытого электрода может быть больше на любой из полярностей в зависимости от марки электрода, его диаметра и тока дуги.

В ряде случаев, например при сварке корневого слоя шва, более высокая проплавляющая способность дуги обратной полярности является нежелательной, так как повышается доля участия основного металла в шве и снижается содержание в нем легирующих элементов. Основной причиной малого объема использования прямой полярности дуги при сварке считается пространственная неустойчивость положения катодного пятна на электроде, приводящая к нестабильности скорости его плавления [5; 6].

В работе [3] приведены данные по скоростям расплавления стальной электродной проволоки при сварке в  $\text{CO}_2$  на обратной и прямой полярности и по коэффициенту расплавления  $\alpha_p$  (таблица 1).

При равных токах обратной и прямой полярностей скорость расплавления стального электрода  $V_3$  и его коэффициент расплавления  $\alpha_p$  на прямой полярности

**Таблица 1.** Соотношение скоростей расплавления стального электрода

Полярность	$V_3$ , см/с	Ток, А	$\alpha_p$ , г/(А·ч)	$H$ , Дж/г
Обратная	5,0	340	13,0	2167
Прямая	8,5	340	22,1	2011
Прямая	5,0	215	20,6	1927

*Примечание.* Проволока Св-08Г2С,  $d=2$  мм, вылет 15,4 мм.

в 1,7 раза выше. Одинаковые скорости расплавления достигаются, если ток дуги прямой полярности уменьшить до  $I=215$  А. Эффективное падение напряжения мощности в электрод при сварке током обратной полярности  $U_{ЭА}=6,95$  Вт/А, для прямой полярности аналогичный показатель составляет  $U_{ЭК}=10,5$  Вт/А. Сюда входит и мощность от нагрева электрода в вылете. Отношение эффективных приэлектродных напряжений мощностей  $U_{ЭК}/U_{ЭА}=1,51$ , что несколько меньше отношения скоростей плавления, равного 1,7. Разница объясняется различным теплосодержанием капель электродного металла.

Эффективные приэлектродные падения напряжения [3] (без учета нагрева вылета) целесообразнее называть удельной эффективной мощностью  $q_y$ , а их размерность выражать в Вт/А. В таком случае точнее отражается их физический смысл. Это полезная мощность, направляемая в электрод или изделие на 1 А тока дуги. Рассматриваемая величина  $q_y$  обладает меньшей зависимостью от параметров дуги, чем более часто используемый эффективный КПД  $\eta_{и}$ , и может использоваться для расчета режимов сварки.

Плавление электродной проволоки удобно анализировать с помощью коэффициента расплавления  $\alpha_p$  (г/А·с), представленного в виде

$$\alpha_p = \frac{V_{Э} \cdot \rho}{j} = \frac{(q_y + q_B)}{\Delta H}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность проволоки, г/см<sup>3</sup>, для алюминия  $\rho=2,7$  г/см<sup>3</sup>;

$j$  – плотность тока на электродной проволоке, А/см<sup>2</sup>;

$q_y$  – мощность от действия приэлектродной области дуги, Вт/А;

$q_B$  – удельная мощность от подогрева вылета электрода, Вт/А;

$\Delta H$  – приращение энтальпии проволоки по отношению к начальной энтальпии, Дж/г.

В левой части выражения (1) расположены легко измеряемые параметры, а в правой те параметры, которые можно измерить только с помощью специальных экспериментов. Поэтому по изменению левой части (1) можно судить о комплексном изменении отношения выделяемой в электрод мощности и теплосодержания капель электродного металла. Если приращение скорости расплавления опережает приращение плотности тока, то это означает, что правая часть возрастает и энергия дуги расходуется более эффективно.

Литературные данные по скорости расплавления электродной алюминиевой проволоки на прямой полярности дуги в аргоне найти не удалось, по-видимому, из-за затруднений при применении этого вида дуги на практике [7]. При сварке алюминия в аргоне дополнительным препятствием к получению таких данных является отсутствие катодного разрушения окисной пленки алюминия.

Мощность, выделяемая на прямой полярности в дуге с неплавящимся вольфрамовым электродом, достаточно подробно исследована в [8; 9], однако физические процессы на плавящемся и неплавящемся катодах сильно отличаются, что не позволяет переносить результаты, полученные для вольфрамовых катодов, на плавящиеся катоды.

Из приведенного анализа следует, что дуга прямой полярности в аргоне на алюминии исследована недостаточно.

Цель работы – оценка перспектив повышения производительности расплавления за счет применения дуги в защитных газах прямой полярности.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Из теории электрической сварочной дуги известно, что удельные эффективные мощности приэлектродных областей свободной дуги можно приближенно определить по формулам:

$$q_{УП} \approx (U_A + U_B); \quad q_{ОП} \approx (U_K + U_B), \quad (2)$$

где  $U_A$  и  $U_K$  – анодное и катодное падение напряжения дуги у изделия соответственно, В;

$U_B$  – напряжение, численно эквивалентное работе выхода электрона из материала изделия. Для алюминия  $U_B=3,74$  В [3].

На основе анализа данных по напряжениям дуг на алюминиевых сплавах ранее были получены выражения для  $U_A$  и  $U_K$  свободной дуги в аргоне на алюминии в зависимости от тока дуги  $I$  [10]:

$$U_A = 1,12 + 1,15 \cdot 10^{-2} I, \quad (3)$$

$$U_K = 11,68 + 2,38 \cdot 10^{-2} I. \quad (4)$$

С учетом  $U_B$  из (2) и формул (3) и (4) получаем выражения для удельных приэлектродных мощностей прямой  $q_{УП}$  и обратной полярностей  $q_{УО}$  в аргоне на алюминиевой электродной проволоке:

$$q_{УО} = 4,86 + 1,15 \cdot 10^{-2} I, \quad (5)$$

$$q_{УП} = 7,94 + 2,38 \cdot 10^{-2} I. \quad (6)$$

Согласно (5) и (6) удельная мощность в алюминиевом электроде дуги прямой полярности существенно больше и интенсивнее растет с увеличением тока дуги, поэтому разница в удельных мощностях возрастает с ростом тока. Это означает, что алюминиевый катод будет плавиться значительно интенсивнее, чем алюминиевый анод.

Для алюминиевого изделия формулы (5) и (6) будут также справедливы, что означает, что проплавляющее воздействие на основной металл выше на обратной полярности дуги. При расчете мощности в изделие  $q_{УО}$  и  $q_{УП}$  нужно поменять местами.

Формулы (5) и (6) проверяли экспериментально, путем сравнения скоростей плавления алюминиевой сварочной электродной проволоки на обратной и прямой полярностях дуги. Наплавку проволокой марки Al 99,7 по EN 18273 S фирмы FIDAT (Италия) диаметром 1,2 мм проводили на сварочной установке FastMigMXF 65 (фирма Кемпи), включающей источник питания постоянного тока и полуавтомат. Наплавка производилась на пластины из сплава АМц толщиной 6 мм. Расход аргона оставался постоянным и составлял 8 л/мин. Настройка режимов наплавки на установке осуществляется

следующим образом: задаются напряжение дуги 22 В и скорость подачи электродной проволоки; установка автоматически подбирает необходимый сварочный ток и поддерживает постоянной заданную скорость подачи электродной проволоки.

Номинальный режим при наплавке на обратной полярности составил  $U=22$  В,  $V_3=13,33$  см/с,  $I=168$  А. Плотность тока на электрод составила  $14862$  А/см<sup>2</sup>. Коэффициент расплавления  $\alpha_p$  в г/(А·с) при механизированной сварке рассчитывали по формуле (1). Получили расчетное  $\alpha_{p0}=8,72$  г/(А·с).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При сварке на прямой полярности энтальпия капель, по данным [11], в большинстве случаев существенно меньше, чем энтальпия при сварке на обратной полярности. Это объясняется возможной разницей в распределении теплоты дуги между электродами, а также положением опорного пятна дуги на электроде. На обратной полярности это пятно устойчиво расположено внизу капли, а на прямой – перемещается на ее поверхности, переходя частично на поверхность твердого металла. Это облегчает теплопередачу и уменьшает перегрев.

В работе [12] проанализированы совместно данные о скоростях расплавления алюминиевой проволоки диаметром 1,6 мм и ее энтальпии при обратной полярности дуги (таблица 2). В таблице 2 приведены значения  $q_{y0}$ , рассчитанные по формуле (5).

Следует отметить, что при увеличении тока в 2 раза скорость плавления электрода увеличилась более интенсивно – в 2,27 раза, несмотря на увеличение энтальпии капель в 1,24 раза. Это стало возможно благодаря опережающему росту удельной эффективной мощности в 1,41 раза.

Учитывая, что информации об энтальпии капель мало и она имеет не очень высокую точность, следует признать удовлетворительную сходимость опытных и расчетных данных  $q_{y0}$ . Опыты на алюминиевой проволоке обладают тем преимуществом, что в них мало сказывается влияние вылета из-за малого удельного

сопротивления алюминия. Отношение приращения  $q_{y0}$  к росту тока для опытных данных составляет 1,36, а для расчетных – 1,19.

Алюминиевая электродная проволока, несмотря на низкую температуру плавления, имеет значительно более высокие значения удельной энтальпии капель (на 1 г) по сравнению со стальной. При передаче мощности от дуги электроду сказывается как более высокая теплопроводность алюминия, так и его низкая температура плавления и плотность. В комплексе получается, что происходит большее поглощение энергии алюминиевой проволокой. В связи с этим коэффициент расплавления алюминиевой проволоки меньше, чем стальной (таблица 3). Поэтому представляло бы интерес сравнение тепловых процессов передачи мощности на образование капли на стальной и алюминиевой проволоках для обратной полярности по методикам [13], так как удельная эффективная мощность в электрод-анод примерно одинакова [3].

Заполнение разделки кромок при сварке в объемном отношении для алюминиевой проволоки эффективнее, чем для стальной, однако затраты энергии значительно больше. По-видимому, подобное соотношение сохранится и в случае использования прямой полярности дуги.

Следует также отметить, что исследования неплавящегося водоохлаждаемого анода в плазматроне на обратной полярности [14] дали в диапазоне токов 100–250 А значение удельной эффективной мощности  $q_{y0}=6,0$  Вт/А, что хорошо согласуется с результатами таблицы 2. Аналогичные результаты получены в [15]. Постоянство  $q_{y0}$  на охлаждаемом электроде плазматрона, вероятно всего, связано со значительной площадью торца электрода, что позволяет анодному пятну дуги свободно расширяться с увеличением тока. У плавящегося электрода происходит рост плотности тока, и с этим связано не только повышение удельной эффективной мощности, но и снижение энтальпии капель, происходящее, по-видимому, из-за перехода к более мелкокапельному переносу.

В работе [12] рассчитано теплосодержание капель при изменении диаметра стальной проволоки в 2 раза

Таблица 2. Расчет  $q_{y0}$  по данным об энтальпии алюминиевых капель и формуле (5)

I, А	H, Дж/см <sup>3</sup>	V <sub>3</sub> , см/с	J, А/мм <sup>2</sup>	q <sub>y0</sub> , Вт/А	
				Опыт	Расчет
100	6320	3,76	50	4,75	6,01
150	7220	6,00	75	5,78	6,59
200	7560	8,54	100	6,46	7,16

Таблица 3. Сравнение отношения  $U_3/\Delta H$  для алюминиевой и стальной проволоки

I, А	V <sub>3</sub> , см/с		U <sub>3</sub> /ΔH, г/(А·с)	
	Al	Fe	Al	Fe
150	6,0	3,76	7,78	14,08
200	8,54	5,27	8,30	14,80

Примечание. Диаметр проволоки 1,6 мм.

Таблица 4. Коэффициенты расплавления проволоки на прямой полярности

Ток, А	179	198	106	164	82
$\alpha_{РП}$ , г/(А·ч)	19,44	18,5	20,73	20,1	17,87

при сохранении плотности тока. Значение  $q_{YO}$  было принято постоянным с учетом нагрева проволоки в вылете:  $q_{YO}=6,1$  Вт/А. При таких условиях энтальпия капля снижается примерно на 10 %, и вследствие этого наблюдается опережающий рост производительности расплавления с увеличением сечения проволоки.

При изменении обратной полярности дуги на прямую полярность на данной установке удалось получить несколько стабильных режимов наплавки при отсутствии катодного разрушения окисной пленки алюминия на детали. Исходные данные и результаты расчетов коэффициента расплавления  $\alpha_{РП}$  приведены в таблице 4.

Статистическая обработка данных пяти опытов по двум критериям, приведенным в [16], установила, что разброс значений носит случайный характер и подчиняется закону нормального распределения. Одним из критериев являлось условие среднего абсолютного отклонения (САО), а вторым – условие для размаха варьирования  $R$ . Среднее значение по пяти опытам  $\alpha_{РП}=19,33$  г/(А·ч), среднее относительное отклонение от него по абсолютной величине составило 4,84 %. Таким образом, данными опытами существенная зависимость коэффициента расплавления на прямой полярности  $\alpha_{РП}$  от тока дуги не установлена.

В то же время сравнение среднего значения из таблицы 4 и значения, полученного для обратной полярности, показывает, что их отношение  $\alpha_{РП}/\alpha_{РО}=19,33/8,72=2,22$ .

Рассчитывали удельную эффективную мощность в электрод для электрода-анода по формуле (5) и получили  $q_{YO}=6,79$  Вт/А.

Также рассчитывали удельную эффективную мощность в электрод для электрода-катода по  $q_{УП}=11,94$  Вт/А. Отношение  $q_{УП}/q_{YO}=11,94/6,79=1,76$ . Это достаточно близко совпадает с отношением коэффициентов расплавления, учитывая, что, как отмечается в литературе, может отличаться теплосодержание капля анода и катода. Так, из таблицы 1 видно, что теплосодержание капля для стальной проволоки на прямой полярности ниже. При прочих равных условиях это способствует повышению скорости расплавления электрода на прямой полярности. Поэтому действительная разница отношений коэффициентов расплавления и  $q_{УП}/q_{YO}$  меньше. Точность оценки мощностей в алюминиевые анод и катод с помощью формул (4) и (5) можно оценить в  $\pm 10$  %.

Использование преимуществ дуги прямой полярности возможно при использовании дуги с разнополярными импульсами тока (РПИ) [17; 18] с частотой импульсов 50–150 Гц, которая достаточно широко используется для сварки алюминиевых сплавов свободной дугой неплавящимся электродом. Внешняя вольт-амперная характеристика таких источников «штыковая» [19]. Современные источники питания с РПИ обеспечивают регулирование сварочного тока значениями как его амплитуды, так и длительности полярностей. За счет изменения соотношения средних токов прямой

и обратной полярности можно регулировать проплавляющую и наплавляющую способности дуги с РПИ [3]. Можно предположить, что нестационарность катодного пятна сварочной дуги на стержневом электроде позволит снизить его блуждание по торцу и стабилизировать скорость его расплавления. Однако для этого необходимо создание источников РПИ с жесткой вольт-амперной характеристикой [20].

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана методика оценки удельных эффективных мощностей от приэлектродных областей дуги в алюминиевую электродную проволоку. Соотношение скоростей расплавления электродной проволоки на прямой и обратной полярностях и соотношение расчетных эффективных приэлектродных мощностей совпадают удовлетворительно. Эта же методика может использоваться и для расчета эффективной мощности в изделии.

2. Энтальпия 1 г алюминиевой проволоки на обратной полярности в 1,8–1,9 раза больше, чем стальной, а объемные скорости расплавления в  $\text{см}^3/\text{с}$  в 1,6 раза выше.

3. Установлено, что скорость плавления алюминиевой электродной проволоки  $d=1,2$  мм в аргоновой дуге на прямой полярности более чем в 2 раза превышает скорость плавления на обратной полярности.

4. Наиболее перспективным направлением использования преимуществ прямой полярности дуги в защитных газах представляется использование источников питания с разнополярными импульсами тока (РПИ).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лозовой В.Г., Дзюба О.В., Дзюба В.М., Штоколов С.А., Курланов С.А. К вопросу о сварке на прямой полярности // Сварка и диагностика. 2014. № 6. С. 55–59.
2. Коберник Н.В., Чернышов Г.Г., Гвоздев П.П., Линник А.А. Влияние рода и полярности тока на плавление электродного и основного металла при сварке под флюсом // Сварка и диагностика. 2011. № 5. С. 24–27.
3. Ленивкин В.А., Дюргеров Н.В., Сагиров Х.И. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. М.: НАКС, 2011. 367 с.
4. Сидоров В.П., Абрамова С.В. Зависимость времени расплавления покрытых электродов от тока дуги // Сварочное производство. 2018. № 10. С. 14–18.
5. Киселев А.С., Гордынец А.С. Влияние параметров режима на пространственную устойчивость дуги при сварке алюминиевых сплавов неплавящимся электродом в среде аргона // Вестник науки Сибири. 2013. № 4. С. 61–66.
6. Ленивкин В.А., Дюргеров Н.Г., Морозкин И.С., Паршин С.Г. Пространственная устойчивость сварочной дуги // Сварка и диагностика. 2016. № 1. С. 16–21.
7. Березовский Б.М. Математические модели дуговой сварки. Т. 3. Челябинск: Изд-во ЮрГУ, 2003. 485 с.

8. Savinov A.V., Polesskiy O.A., Lapin I.E., Lysak V.I., Krasikov P.P., Chudin A.A. Electrophysical characteristics of arc and formation of welded joints for welding with a non-consumable electrode // *Journal of Materials Processing Technology*. 2017. Vol. 239. P. 195–201. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.08.021.
9. Savinov A.V., Lapin I.E., Polesskiy O.A., Lysak V.I., Krasikov P.P. Thermal and force effects of the arc on the weld pool in non-consumable electrode (TIG) welding in inert gas mixtures // *Welding International*. 2016. Vol. 30. № 12. P. 941–944. DOI: 10.1080/09507116.2016.1157332.
10. Сидоров В.П. Методика оценки приэлектродных падений напряжения на дуге, горящей в аргоне между вольфрамом и алюминием // *Автоматическая сварка*. 1991. № 6. С. 36–37.
11. Походня И.К., Суттель А.М. Теплосодержание капель электродного металла при сварке в углекислом газе // *Автоматическая сварка*. 1970. № 10. С. 5–8.
12. Сидоров В.П. Расчеты параметров сварки плавлением. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2017. 286 с.
13. Кархин В.А. Тепловые процессы при сварке. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. 572 с.
14. Быховский Д.Г., Беляев В.М. Энергетические характеристики плазменной дуги при сварке на обратной полярности // *Автоматическая сварка*. 1971. № 5. С. 27–30.
15. Щицын Ю.Д., 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.
16. Захаров Ю.В. Математическое моделирование технологических систем. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2015. 84 с.
17. Гринюк А.А., Коржик В.Н., Шевченко В.Е., Бабич А.А., Пелешенко С.И., Чайка В.Г., Тищенко А.Ф., Ковбасенко Г.В. Основные тенденции развития плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов // *Автоматическая сварка*. 2015. № 11. С. 39–50.
18. Савинов А.В., Полесский О.А., Лапин И.Е., Лысак В.И., Чудин А.А., Красиков П.П. Проплаивающая способность дуги переменного тока с прямоугольной формой импульсов // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2016. № 2. С. 135–141.
19. Сидоров В.П., Советкин Д.Э. Расплавление точек на алюминии сжатой дугой с разнополярными импульсами тока // *Химия. Экология. Урбанистика: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. Т. 2. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2019. С. 545–549.*
20. Милютин В.С., Шалимов М.П., Шанчуров С.М. Источники питания для сварки. М.: Айрис-пресс, 2007. 384 с.
21. Lenivkin V.A., Dyurgerov N.V., Sagirov Kh.I. *Tekhnologicheskie svoystva svarochnoy dugi v zashchitnykh gazakh* [Technological properties of the arc in shielding gases]. Moscow, NAKS Publ., 2011. 367 p.
22. Sidorov V.P., Abramova S.V. Dependence of the melting time of coated electrodes from arc current. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2018, no. 10, pp. 14–18.
23. Kiselev A.S., Gordynets A.S. The effect of the parameters of the regime on the spatial stability of the arc during argon tungsten-arc welding of aluminum alloys. *Vestnik nauki Sibiri*, 2013, no. 4, pp. 61–66.
24. Lenivkin V.A., Dyurgerov N.G., Morozkin I.S., Parshin S.G. Spatial stability of the welding arc. *Svarka i diagnostika*, 2016, no. 1, pp. 16–21.
25. Berezovsky B.M. *Matematicheskie modeli dugovoy svarki* [Mathematical models of arc welding]. Chelyabinsk, YurGU Publ., 2003. Vol. 3, 485 p.
26. Savinov A.V., Polesskiy O.A., Lapin I.E., Lysak V.I., Krasikov P.P., Chudin A.A. Electrophysical characteristics of arc and formation of welded joints for welding with a non-consumable electrode. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, vol. 239, pp. 195–201. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.08.021.
27. Savinov A.V., Lapin I.E., Polesskiy O.A., Lysak V.I., Krasikov P.P. Thermal and force effects of the arc on the weld pool in non-consumable electrode (TIG) welding in inert gas mixtures. *Welding International*, 2016, vol. 30, no. 12, pp. 941–944. DOI: 10.1080/09507116.2016.1157332.
28. Sidorov V.P. A technique for evaluating near-electrode voltage drops on an arc burning in argon between tungsten and aluminum. *Avtomaticheskaya svarka*, 1991, no. 6, pp. 36–37.
29. Pokhodnya I.K., Suttel A.M. The enthalpy of the droplets of the electrode metal when welding in carbon dioxide. *Avtomaticheskaya svarka*, 1970, no. 10, pp. 5–8.
30. Sidorov V.P. *Raschety parametrov svarki plavlaniem* [Calculations of fusion welding parameters]. Togliatti, TGU Publ., 2017. 286 p.
31. Karkhin V.A. *Teplovye protsessy pri svarke* [Thermal processes during welding]. Saint Peterburg, Politekhn. un-t Publ., 2015. 572 p.
32. Bykhovskiy D.G., Belyaev V.M. Energy characteristics of a plasma arc during welding at reverse polarity. *Avtomaticheskaya svarka*, 1971, no. 5, pp. 27–30.
33. Shchitsyn Yu.D., Kosolapov O.A., Strukov N.N. Energy distribution in a compressed arc when the plasma torch operates on a current of reverse polarity. *Svarka i diagnostika*, 2010, no. 3, pp. 13–16.
34. Zakharov Yu.V. *Matematicheskoe modelirovanie tekhnologicheskikh sistem* [Mathematical modeling of technological systems]. Yoshkar-Ola, PGTU Publ., 2015. 84 p.
35. Grinyuk A.A., Korzhik V.N., Shevchenko V.E., Babich A.A., Peleshenko S.I., Chayka V.G., Tishchenko A.F., Kovbasenko G.V. Development trends of plasma-arc welding of aluminum alloys. *Avtomaticheskaya svarka*, 2015, no. 11, pp. 39–50.
36. Savinov A.V., Polesskiy O.A., Lapin I.E., Lysak V.I., Chudin A.A., Krasikov P.P. Penetrating power of alternating current arc with a rectangular pulse shape. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, no. 2, pp. 135–141.

## REFERENCES

1. Lozovoy V.G., Dzyuba O.V., Dzyuba V.M., Shtokolov S.A., Kurlanov S.A. To the question of welding on direct polarity. *Svarka i diagnostika*, 2014, no. 6, pp. 55–59.
2. Kobernik N.V., Chernyshov G.G., Gvozdev P.P., Linnik A.A. Influence of the type and polarity of the current on the penetration of the electrode and base metal for arc welding under flux and al. *Svarka i diagnostika*, 2011, no. 5, pp. 24–27.

19. Sidorov V.P., Sovetkin D.E. Melting points on aluminum by a compressed arc with bipolar current pulses. *Materialy Vseros. nauchno-prakt. konf. "Khimiya. Ekologiya. Urbanistika"*. Perm, PNIPU Publ., 2019. Vol. 2, pp. 545–549.
20. Milyutin V.S., Shalimov M.P., Shanchurov S.M. *Istochniki pitaniya dlya svarki* [Power sources for welding]. Moscow, Ayris-press Publ., 2007. 384 p.

**CONCERNING THE MELTING OF AN ALUMINIUM ELECTRODE  
BY THE ARGON ARC OF STRAIGHT POLARITY**

© 2019

*V.P. Sidorov*, Doctor of Sciences (Engineering), Professor,  
professor of Chair “Welding, Material Pressure Processing and Allied Processes”  
*D.E. Sovetkin*, lecturer of Chair “Welding, Material Pressure Processing and Allied Processes”  
*N.A. Borisov*, student  
*Togliatti State University, Togliatti (Russia)*

*Keywords:* welding arc; consumable electrode; aluminum; direct polarity; remelting stability, shielding gas welding.

*Abstract:* This paper gives the information analysis on the ratio of the melting rate of electrode wire on welding arcs of direct and reverse polarity in CO<sub>2</sub>. At equal currents, the melting rate on direct polarity arc is about two times higher than the melting rate on reverse polarity arc. When welding in shielding gases, the reason to refuse the use of direct polarity arc is the low melting rate stability of the electrode wire. It is caused by the intense moving of arc cathode spot affected by the emissivity change of the electrode surface. Within the scope of this paper, the authors propose a calculation method for arc power transmitted to a consumable aluminum electrode on various polarities. The calculated specific power (per 1 A of the current) is significantly higher for electrode-cathode, and when step-up the current, the power increases more intensively than for anode. The experiment determined the melting rate of aluminum electrode wire of 1.2 mm diameter for direct polarity arc in argon. It is as well about two times higher than for reverse polarity. Within the limits of 80–180 A currents on the arc direct polarity, there was not defined any significant dependence between the melting ratio of aluminum wire and arc current. The calculation method ensures good convergence of designed and experimental data on the ratio of electrode melting rates on different polarities. The formulas obtained allowed evaluating the effective arc power in argon for aluminum products. Further researches are to be aimed at defining the stability conditions of the melting rate of electrode wire on direct polarity arc in shielding gases. It is especially necessary for welding of heavy thickness parts to reach more efficient filling of edge preparation.