

Шицын Ю.Д., Шицын В.Ю., Неулыбин С.Д., Никулин Р.Г., Никулина С.Г., Карунакаран К.П. Исследование работы анодов дуговых плазматронов для работы на обратной полярности тока // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 60–67. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.3.08

Shitsyn Y.D., Shitsyn V.Y., Neulybin S.D., Nikulin R.G., Nikulina S.G., Karunakarah K.P. Investigation of the operation of the anodes of arc plasmotrons for operation on reverse polarity of current. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 60–67. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.3.08

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение

Т. 22, № 3, 2020

Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science

<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2020.3.08

УДК 621.791

Ю.Д. Шицын¹, В.Ю. Шицын¹,
С.Д. Неулыбин², Р.Г. Никулин¹,
С.Г. Никулина¹, К.П. Карунакаран³

¹Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

²Институт механики сплошных сред, филиал Пермского федерального
исследовательского центра Уральского отделения РАН, Пермь, Россия

³Индийский технологический институт, Мумбаи, Индия

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ АНОДОВ ДУГОВЫХ ПЛАЗМОТРОНОВ ДЛЯ РАБОТЫ НА ОБРАТНОЙ ПОЛЯРНОСТИ ТОКА

Эксплуатационные возможности дуговых плазматронов определяются эффективностью охлаждения теплонагруженных элементов: электрода и плазмообразующего сопла. Одной из интегральных характеристик электродов плазматрона является удельная эрозия, определяемая совокупностью процессов, происходящих в приэлектродной области и на поверхности рабочей зоны электрода. Подавляющее большинство плазматронов разработаны для работы на постоянном токе прямой полярности. Это объясняется тем, что на аноде дуги выделяется большее количество тепла, чем на катоде. Предельно допустимая нагрузка на лантанированный вольфрамовый электрод на переменном токе примерно в два раза, а на обратной полярности, при использовании постоянного тока в десять раз ниже, чем на прямой полярности. Однако в ряде случаев, например при сварке алюминиевых и магниевых сплавов, наплавке различных сплавов, необходимо использовать ток обратной полярности. Эксперименты, проводимые с вольфрамовыми анодами различной конструкции, показали низкую их стойкость. Это объясняется недостаточной теплопроводностью вольфрама. В настоящее время используются аноды из меди различной конструкции и комбинированные. Такие конструкции анодов имеют свои преимущества и недостатки.

Упрощение конструкции анодов плазматронов, работающих на токе обратной полярности, и повышение их стойкости является актуальной задачей.

Дан краткий анализ существующих конструкций анодов плазматронов для работы на токе обратной полярности. Исследована работа новой конструкции анода плазматрона с глухим отверстием в рабочем торце. Установлены соотношения размеров глухого отверстия и плазмообразующего сопла, обеспечивающие стабильное горение плазменной дуги. Произведена оценка эрозии анода предложенной конструкции. Выявлены высокие эксплуатационные характеристики анода новой конструкции.

Ключевые слова: дуговые плазматроны, плазменная дуга, обратная полярность тока, прямая полярность тока, электрод-анод, анодное пятно, электрод-катод, катодное пятно, калориметрирование, эрозия электродов.

Y.D. Shitsyn¹, V.Y. Shitsyn¹, S.D. Neulybin², R.G. Nikulin¹,
S.G. Nikulina¹, K.P. Karunakarah³

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²Institute of Continuous Mechanics, a Branch Perm Federal Research Center
of the Ural Branch of the RAS,
Perm, Russian Federation

³Indian Institute of Technology, Mumbai, India

INVESTIGATION OF THE OPERATION OF THE ANODES OF ARC PLASMATRONS FOR OPERATION ON REVERSE POLARITY OF CURRENT

The operational capabilities of arc plasmotrons are determined by the efficiency of cooling of heat-loaded elements: an electrode and a plasma-forming nozzle. One of the integral characteristics of plasmatron electrodes is specific erosion, which is determined by a set of processes occurring in the near-electrode region and on the surface of the working area of the electrode. The vast majority of plasmotrons are designed to

operate on direct current of direct polarity. This is because more heat is generated at the anode of the arc than at the cathode. The maximum permissible load on a lanthanum tungsten electrode on alternating current is approximately two times, and on reverse polarity, when using direct current, it is ten times lower than on direct polarity. However, in some cases, for example, when welding aluminum and magnesium alloys, surfacing of various alloys, it is necessary to use a reverse polarity current. Experiments carried out with tungsten anodes of various designs have shown their low durability. This is due to the insufficient thermal conductivity of tungsten. Currently, copper anodes of various designs and combined are used. Such anode designs have their own advantages and disadvantages.

Simplification of the design of the anodes of plasmatrons operating on reverse polarity current and increasing their resistance is an urgent task.

In the presented work, a brief analysis of the existing designs of plasmatron anodes for operation with reverse polarity current is given. The work of the new design of the plasmatron anode with a blind hole in the working end is investigated. The ratios of the sizes of the blind hole and the plasma-forming nozzle, which ensure stable combustion of the plasma arc, have been established. Erosion of the anode of the proposed design is assessed. High performance characteristics of the new design anode were revealed.

Keywords: arc plasmatrons, plasma arc, reverse polarity of current, forward polarity of current, electrode-anode, anode spot, electrode-cathode, cathode spot, calorimetry, electrode erosion.

Многообразие процессов плазменной обработки материалов определяет различие конструкций дуговых плазмотронов. Эксплуатационные возможности плазмотронов определяются эффективностью охлаждения теплонагруженных элементов: электрода и плазмообразующего сопла. Подавляющее большинство плазмотронов разработаны для работы на постоянном токе прямой полярности. Это объясняется тем, что на аноде дуги выделяется большее количество тепла, чем на катоде. Предельно допустимая нагрузка на лантанированный вольфрамовый электрод на переменном токе примерно в два раза, а на обратной полярности, при использовании постоянного тока, в десять раз ниже, чем на прямой полярности [1–3]. Однако в ряде случаев, например при сварке алюминиевых и магниевых сплавов, наплавке различных сплавов, необходимо использовать ток обратной полярности.

Опыт показывает, что для обеспечения адекватной стойкости сечение вольфрамового электрода, при работе на обратной полярности тока, должно быть в девять раз больше, чем на прямой полярности. Стараются рассредоточить разряд по поверхности анода для снижения плотности теплового потока в анод. Эксперименты, проводимые с вольфрамовыми электродами различной конструкции (рис. 1), показали, что при токе 150 А и токе возбуждения 50 А они разрушались за время меньше 23 мин, а при токе 200 А – за 2–3 мин [2]. Это объясняется недостаточной теплопроводностью вольфрама.

Эксперименты, проведенные с медными анодами (теплопроводность в три раза выше, чем у вольфрама) различной конструкции (рис. 2), показали, что конструкции 1 и 2 при токе 200 А и токе возбуждения 50 А быстро разрушались [2].

На электроде 3 активное пятно располагалось на кромке электрода, что приводило к аварийной работе плазмотрона (двойной дуге). Электрод конструкции 4 при токе 200 А имел ресурс 300 мин при 60 возбуждениях дуги.

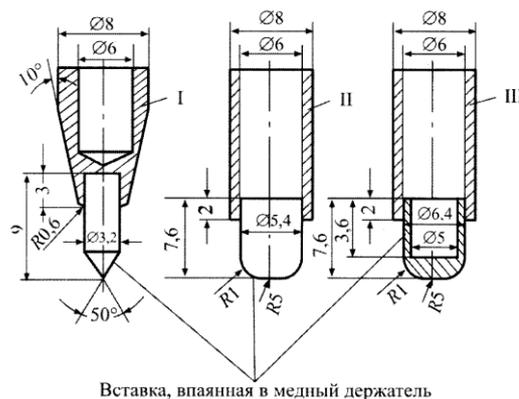


Рис. 1. Конструкции электродов-анодов из вольфрама

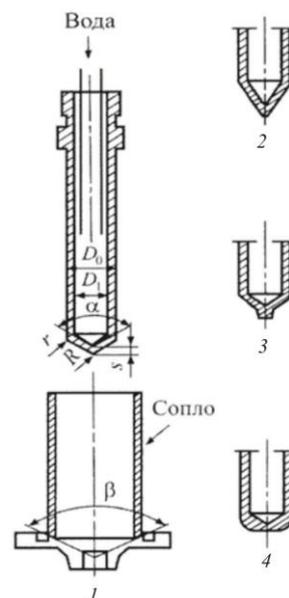


Рис. 2. Конструкции медных электродов-анодов

Считается, что рост ресурса анодов связан с увеличением размеров электродов и улучшением их охлаждения. Предложен анодный узел, состоящий из медной водоохлаждаемой державки и вольфрамовой вставки (рис. 3) [3].

d , мм	6	6	8
D , мм	12	17	25

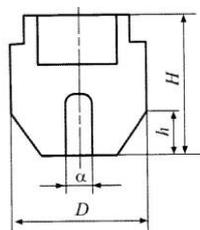


Рис. 3. Конструкция комбинированного анода

Высокая стойкость анода обеспечивается качественным соединением меди с вольфрамом и системой водяного охлаждения. Наилучшие результаты достигались при осадке расплавленной меди на вольфрамовую вставку. Стойкость таких анодов достигает 100–300 ч при рабочем токе до 400 А при 100–500 включениях.

При высоких эксплуатационных характеристиках имеется существенный недостаток – сложность изготовления и невозможность восстановления при отработке ресурса или аварийном выходе из строя.

С целью повышения стойкости электрода и расширения технологических возможностей плазменной резки были разработаны плазматроны с полым медным электродом (рис. 4) [4–6]. Они состоят из полого внутреннего электрода-анода, завихрителя и сопловой части.

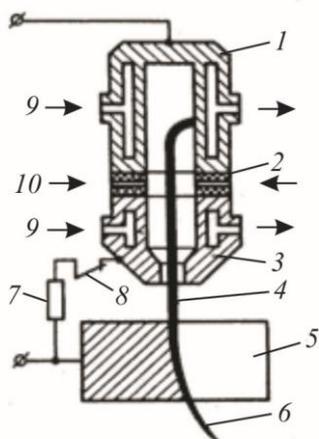


Рис. 4. Принципиальная схема плазматрона с медным полым анодом: 1 – полый внутренний электрод; 2 – завихритель; 3 – сопловая часть; 4 – дуга; 5 – металл; 6 – струя плазмы; 7 – балластное сопротивление; 8 – контактор; 9 – подача охлаждающей воды; 10 – подача воздуха

Отличительной особенностью полых электродов является интенсивное перемещение опорного пятна дуги по сильно охлаждаемой цилиндрической поверхности электрода, которое осуществляется под действием газового циклона, создаваемого тангенциальными отверстиями в завихрителе и наличием соленоида на внешней поверхности плазматрона. При этом обеспечивается стабильное положение столба дуги по оси полости электрода и не допускается локальный нагрев электрода и сопла. Интенсивное охлаждение обеспечивает длительный срок службы электродов.

К недостаткам плазматронов с полым электродом можно отнести необходимость использования источников питания сварочного тока с напряжением холостого хода $U_{xx} \approx 300 \dots 500$ В. Рабочее напряжение составляет порядка $U_d \approx 150$ В [4, 6]. Плазматроны с полым электродом из-за наличия соленоида имеют повышенные габариты и массу.

Совершенствование конструкций электродов-анодов для работы плазматронов на токе обратной полярности, обеспечивающих длительный ресурс работы при упрощении устройства, является актуальной задачей. Стойкость электродов определяется скоростью эрозии, которая зависит от свойств материалов электродов, их геометрии, рода газа, в котором осуществляется разряд, тока дуги, скорости газового потока и многих других факторов [7–10].

Авторами предложена новая конструкция электрода-анода плазматрона (рис. 5). Медный электрод-анод плазматрона 1 расположен внутри плазмообразующего сопла 2. Рабочий торец электрода выполнен сферическим. Радиус сферы равен половине диаметра электрода. В рабочем торце электрода выполнено глухое отверстие 3. Канал 4 плазмообразующего сопла 2 имеет диаметр d_c , определяемый рабочим током. Системы водяного охлаждения плазматрона и подачи плазмообразующего газа на схеме не показаны. Анод имеет прямое водяное охлаждение. В плазматроне обеспечивалась тангенциальная подача плазмообразующего газа. Предполагается, что при работе плазматрона будет обеспечено равномерное распределение анодного пятна по внутренней поверхности отверстия в рабочем торце электрода. Это обеспечит стабильное зажигание и горение плазменной дуги при напряжении холостого хода источника питания не выше 75 В и длительную работу электрода при достаточно больших значениях тока.

Целью работы являлось исследование энергетических и эксплуатационных характеристик плазматрона с предложенной конструкцией электрода-анода при работе на токе обратной полярности.

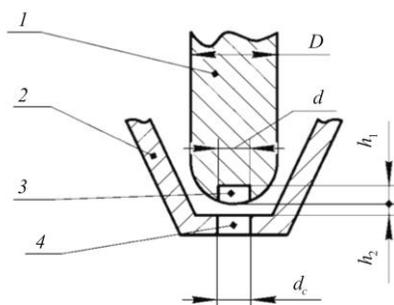


Рис. 5. Схема плазмотрона с анодом с глухим отверстием в торце

Для получения объективных результатов проводились сравнительные исследования работы плазмотрона с электродом-анодом с вольфрамовой вставкой и электродом-анодом предложенной конструкции (рис. 6).

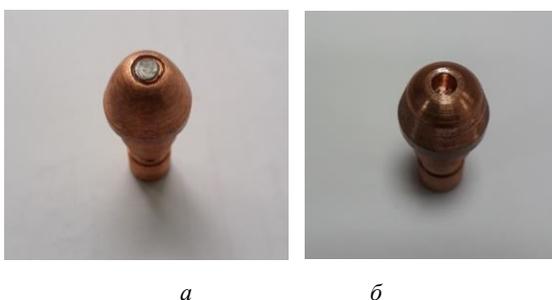


Рис. 6. Внешний вид анодов: а – с вольфрамовой вставкой; б – с глухим отверстием в торце

Проводились исследования теплопередачи в плазмотрон и изделие при изменении тока дуги, диаметра плазмообразующего сопла, диаметра и глубины отверстия в торце анода (табл. 1).

Таблица 1

Параметры режимов исследований*

№ п/п	Параметр	Значение
1	Ток дуги I_d , А	100, 150, 200, 250
2	Расстояние от плазмотрона до изделия $h_{с-и}$, мм	5
3	Диаметр отверстия в торце анода d , мм	2, 4, 5
4	Диаметр плазмообразующего сопла d_c , мм	4, 5, 6
5	Расход плазмообразующего газа $Q_{п}$, л/мин	2,5
6	Расход защитного газа $Q_з$, л/мин	5

Примечание. *Остальные параметры не изменялись.

На первом этапе определили соотношение размеров отверстия в торце анода и плазмообразующего сопла, при котором обеспечивалось надежное

зажигание плазменной дуги на изделие и стабильное горение при напряжении холостого хода источника питания $U_{xx} = 75$ В. Стабильная работа плазмотрона обеспечивалась при диаметре отверстия $d = (0,75 \dots 1,0)d_c$; глубина $h_1 = (1,0 \dots 1,3)d$, а зазор h_2 между рабочим торцом электрода и внутренней плоской поверхностью сопла $h_2 = (0,2 \dots 0,3)d_c$.

Теплопередача в плазмотрон и изделие определялась калориметрированием по методике, описанной в работах [11, 12]. Кроме того, фиксировалось падение напряжения на дуге и ее участках (рис. 7).

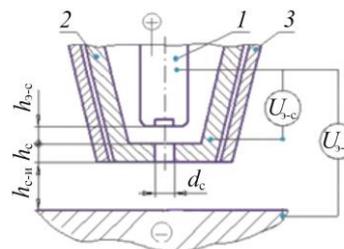


Рис. 7. Схема измерения значений напряжения при работе плазмотрона: 1 – электрод-анод; 2 – плазмообразующее сопло; 3 – защитное сопло

Весь массив результатов и их обработка в данной статье не представлены. Ниже показаны результаты исследования на повышенном токе, как наиболее характерные. Результаты исследований показали близкие значения падений напряжения на дуге и ее участках при работе плазмотрона с обеими конструкциями анода (табл. 2). Отмечается небольшое превышение падения напряжения на дуге и участке электрод–сопло, а также мощности дуги при работе плазмотрона с анодом с отверстием в торце. Теплопередача в плазмотрон и изделие также выше (на 1,5–3 %).

Таблица 2

Падение значений напряжения и теплопередача в плазмотрон и изделие

№ п/п	Параметр	Значение		
1	d_c , мм	4	5	6
2	I , А	200	200	200
3	* $U_{э-с}$, В	21,2	20,3	18,7
4	$U_{э-с}$, В	21,7	21,3	19,2
5	* $U_{э-и}$, В	33,2	31,2	28,6
6	$U_{э-и}$, В	33,5	32,0	29,0
7	* $P_{и}$, Вт	4530	4190	3531
8	$P_{и}$, Вт	4570	4240	3610
9	* $P_{пл}$, Вт	2147	2100	1885
10	$P_{пл}$, Вт	2200	2252	1900
11	* P_d , Вт	6640	6220	5720
12	P_d , Вт	6700	6400	5800

Примечание. *Анод с вольфрамовой вставкой.

Таким образом, энергетические характеристики плазмотрона с анодом с отверстием в торце не уступают таковым при использовании анода с вольфрамовой вставкой.

Для поддержания длительной непрерывной работы плазмотрона в заданном режиме требуется высокая стойкость анода. Одной из интегральных характеристик электродов плазмотрона является удельная эрозия, определяемая совокупностью процессов, происходящих в приэлектродной области и на поверхности рабочей зоны электрода. Под действием мощного сосредоточенного источника тепла, каковым является приэлектродный участок дуги, происходит активный унос материала электрода путем испарения и разбрызгивания [7, 8, 13].

Скорость эрозии материала анодов при прочих равных условиях значительно ниже, чем катодов [7, 8, 13–15], но эрозионные процессы на аноде в целом изучены меньше, чем на катоде. Считается, что разрушение анодов определяется плотностью теплового потока через дуговое пятно [2, 7, 16, 17]. В работах [13, 18, 19] показано, что анодное пятно имеет форму правильного круга и плотность тока в нем достигает 10^3 – 10^5 А/см². Исследования температуры в анодных пятнах дают значительные расхождения [2, 14, 20]. Отсутствие единой теории анодных процессов не позволяет обобщить имеющиеся опытные данные. Считается, что минимальный тепловой поток в анод обеспечивается при диффузной привязке дуги к электроду [2, 14]. Однако отмечается, что диффузная привязка дуги к электроду неустойчива. Любое возмущение потока газа, обдувающего дугу, неоднородность поверхности или наличие оксидов на ней могут перевести прианодный участок дуги в контрагированный режим. При этом возрастает плотность тока на аноде. Уменьшение скорости эрозии анода при контрагированном

пятне дуги можно достичь снижением времени существования пятна или увеличением площади. Предположительно, наличие глухого отверстия оптимальных размеров в рабочем торце анода должно снизить плотность тока в анодном пятне за счет увеличения площади пятна привязки. Не исключается вероятность перемещения анодного пятна по внутренней поверхности отверстия, что снизит время привязки пятна к одному месту.

Оценка скорости эрозии анода с отверстием в торце проводилась при работе плазмотрона на повышенных токах. Оценивали потерю массы анода при непрерывной работе на токе дуги 200 и 250 А в течение 1 и 2 ч.

1. $Q_{в-изд} = 2$ л/мин; $Q_{в-п} = 1,5$ л/мин; $d_c = 4$ мм; $d_a = 4$ мм; $Q_3 = 4,0$ л/мин; $Q_{пл} = 1,5$ л/мин; обратная полярность; эрозия электрода при работе: 200 А – $G = m/Pt = 0,000\ 002\ 5$ гВт/ч; 250 А – $G = 0,000\ 002\ 2$ гВт/ч.

2. $Q_{в-изд} = 3$ л/мин; $Q_{в-п} = 1,5$ л/мин; $d_c = 5$ мм; $d_a = 5$ мм; $Q_3 = 4,0$ л/мин; $Q_{пл} = 1,5$ л/мин; обратная полярность тока; эрозия электрода при работе: 200 А – $G = 0,000\ 001\ 7$ гВт/ч; 250 А – $G = m/Pt = 0,000\ 002\ 0$ гВт/ч.

В процессе экспериментов выполнялась визуальная оценка стабильности горения дуги и внешнего вида рабочей части анода после работы. В течение всего цикла стабильность работы не нарушалась. Внешний вид анода после работы показывает отсутствие привязки анодного пятна к локальному месту (рис. 8).

Выполненные исследования показывают, что анод с глухим отверстием в торце нельзя рассматривать как классический полый электрод, в котором анодное пятно активно перемещается по внутренней цилиндрической поверхности. Иллюстрацией этого может служить быстрая эрозия рабочей части электрода при использовании его в качестве катода при работе плазмотрона на токе прямой полярности (рис. 9).

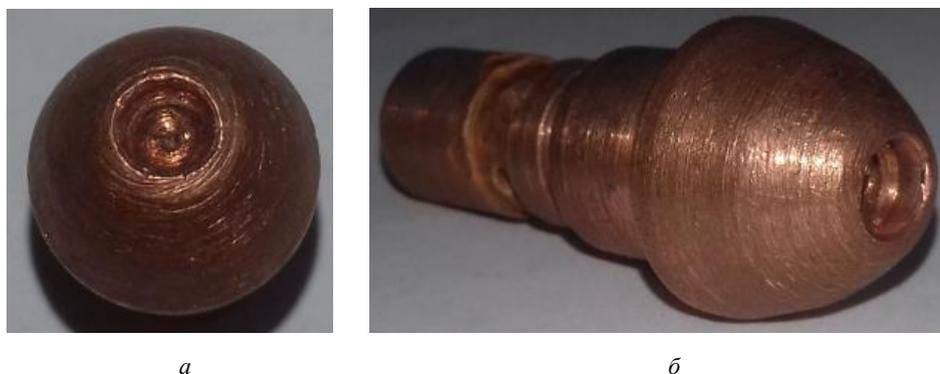


Рис. 8. Анод с отверстием в торце до и после работы на обратной полярности при токах: а – 200 А; б – 250 А

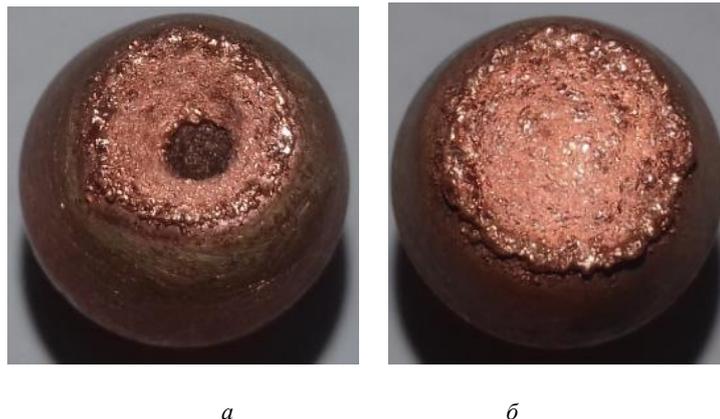


Рис. 9. Катод с отверстием в торце до и после работы на прямой полярности при токах: *a* – 200 А; *б* – 250 А, время работы 30 с

Таким образом, медный электрод-анод плазмотрона для работы на токе обратной полярности, снабженный глухим отверстием оптимальных размеров в рабочем торце электрода, обеспечивает длительную и стабильную работу плазмотрона на токе обратной полярности. Удельная эрозия электрода-анода на повышенных токах не превышает 0,000 002 5 гВт/ч. Предположительно, наличие глухого отверстия оптимальных размеров в рабочем торце анода снизит плотность тока в анодном пятне за счет увеличения площади пятна привязки. Не исключается вероятность перемещения анодного пятна по внутренней поверхности отверстия, что снизит время привязки пятна к одному месту.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-60043\19 и финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по Государственному заданию FSNM-2020-0028 Министерства образования и науки Пермского края в рамках Соглашения С-26/795 от 21.12.2017

Список литературы

1. Эсибян Э.М. Плазменно-дуговая аппаратура. – Киев: Техника, 1971. – 164 с.
2. Петров А.В. Плазменная сварка // Итоги науки и техники. Сварка / ВИНТИ. – 1980. – Т. 12 – С. 53–108.
3. Щицын Ю.Д. Плазменные технологии и оборудование. – Пермь: Из-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 75 с.
4. Исследование и оптимизация электроплазменной резки металлов / Ю.Я. Киселев [и др.]. – Кишинев: Штиинца, 1981. – 112 с.
5. Щицын Ю.Д. Плазменная обработка материалов. – Пермь: Из-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 143 с.
6. Киселев Ю.Я. Энергетические процессы плазменно-воздушной резки металлов. – Кишинев: Штиинца, 1980. – 76 с.
7. Кесаев И.Г. Катодные процессы электрической дуги. – М.: Наука, 1968. – 243 с.
8. Прикладная динамика термической плазмы / М.Ф. Жуков [и др.]. – Новосибирск: Наука, 1975. – 297 с.
9. Дембовский В. Плазменная металлургия: пер. с чеш. – Прага: СНТЛ; М.: Металлургия, 1981. – 280 с.
10. Перегудов В.С., Попенко В.Г. Эрозия электродов при малых токах дуги в воздушной среде / Тез. докл. 9-й Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы, г. Фрунзе, 20–22 октября 1983. – Фрунзе, 1983. – С. 138–139.
11. Щицын Ю.Д., Косолапова О.А. Влияние полярности на тепловые нагрузки плазмотрона // Сварочное производство. – 1997. – № 3. – С. 23–25.
12. Щицын В.Ю., Язовских В.М. Влияние полярности на тепловложение в сопло плазмотрона // Сварочное производство. – 2002. – № 1. – С. 27–29.
13. Раховский В.И. Эрозия электродов в конрагированных разрядах // Известия СО АН СССР. Сер. техн. наук. – 1975. – № 3, вып. 1. – С. 21–27.
14. Оптимизация анодного узла с аргоновой защитой / Ж. Жеенбаев [и др.] // Тез. докл. 5-й Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы, г. Новосибирск, 17–22 августа 1972 г. – Новосибирск, 1972. – Ч. 2. – С. 60–62.
15. Аньшаков А.С., Жуков М.Ф., Сухинин Ю.И. Исследование эрозии выходных электродов в плазмотронах вихревой системы // Тез. докл. 5-й Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы, г. Новосибирск, 17–22 августа 1972 г. – Новосибирск, 1972. – Ч. 2. – С. 44–47.
16. Васенко И.П. Эрозия электродов коаксиального подогревателя // Тез. докл. 9-й Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы, г. Фрунзе, 20–22 октября 1983 г. – Фрунзе, 1983. – С. 140–141.
17. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. – М.: Машиностроение, 1970. – 336 с.

18. Раховский В.И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. – М.: Наука, 1970. – 536 с.

19. Грановский Л.Г. Электрический ток в газе. Установившийся ток. – М.: Наука, 1971. – 543 с.

20. Урюков Б.А. Теория эрозии электродов в нестационарных электродных пятнах электрической дуги // Известия СО АН СССР. Сер. техн. наук. – 1975. – № 8, вып. 2. – С. 31–30.

References

1. Esibian E.M. Plazmenno-dugovaia apparatura [Plasma-arc equipment]. Kiev: Tekhnika, 1971, 164 p.

2. Petrov A.V. Plazmennai svarka [Plasma welding]. *Itoги nauki i tekhniki. Svarka. VINITI*, 1980, vol. 12, pp. 53–108.

3. Shchitsyn Iu.D. Plazmennye tekhnologii i oborudovanie [Plasma technology and equipment]. Perm': Izdatel'stvo Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, 2014, 75 p.

4. Issledovanie i optimizatsiia elektroplazmennoi rezki metallov [Research and optimization of electroplasma cutting of metals]. Iu.Ia. Kiselev et al. Kishinev: Shtiintsa, 1981, 112 p.

5. Shchitsyn Iu.D. Plazmennai obrabotka materialov [Plasma material processing]. Perm': Izdatel'stvo Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, 2014, 143 p.

6. Kiselev Iu.Ia. Energeticheskie protsessy plazmenno-vozdushnoi rezki metallov [Energy processes of plasma-air metal cutting]. Kishinev: Shtiintsa, 1980, 76 p.

7. Kesaev I.G. Katodnye protsessy elektricheskoi dugi [Cathode processes of electric arc]. Moscow: Nauka, 1968, 243 p.

8. Prikladnaia dinamika termicheskoi plazmy [Applied Thermal Plasma Dynamics]. M.F. Zhukov et al. Novosibirsk: Nauka, 1975, 297 p.

9. Dembovskii V. Plazmennai metallurgii [Plasma metallurgy]. Praga, SNTL; Moscow: Metallurgii, 1981, 280 p.

10. Peregudov V.S., Popenko V.G. Eroziia elektrodov pri mal'kikh tokakh dugi v vozdushnoi srede [Electrode erosion at low arc currents in the air environment]. *Tezisy dokladov 9-i Vsesoiuznoi konferentsii po generatoram nizkotemperaturnoi plazmy, g. Frunze, 20–22 oktiabria 1983*. Frunze, 1983, pp. 138–139.

11. Shchitsyn Iu.D., Kosolapova O.A. Vliianie poliarnosti na teplovye nagruzki plazmotrona [The effect of polarity on plasmatron thermal loads]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1997, no. 3, pp. 23–25.

12. Shchitsyn V.Iu., Iazovskikh V.M. Vliianie poliarnosti na teplovlozhenie v soplo plazmotrona [The effect of polarity on the thermal investment in the plasmatron nozzle]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2002, no. 1, pp. 27–29.

13. Rakhovskii V.I. Eroziia elektrodov v konragirovannykh razriadakh [Electrode erosion in congested discharges]. *Izvestiia SO AN SSSR. Serii tekhnicheskie nauki*, 1975, no. 3, iss. 1, pp. 21–27.

14. Optimizatsiia anodnogo uzla s argonovoi zashchitoy [Optimization of the anode unit with argon protection].

Zh. Zheenbaev et al. *Tezisy dokladov 5-i Vsesoiuznoi konferentsii po generatoram nizkotemperaturnoi plazmy, g. Novosibirsk, 17–22 avgusta 1972 g.* Novosibirsk, 1972, part 2, pp. 60–62.

15. An'shakov A.S., Zhukov M.F., Sukhinin Iu.I. Issledovanie erozii vykhodnykh elektrodov v plazmotronakh vikhrevoi sistemy [Investigation of output electrode erosion in the vortex system plasmatrons]. *Tezisy dokladov 5-i Vsesoiuznoi konferentsii po generatoram nizkotemperaturnoi plazmy, g. Novosibirsk, 17–22 avgusta 1972 g.* Novosibirsk, 1972, part 2, pp. 44–47.

16. Vasenko I.P. Eroziia elektrodov koaksial'nogo podogrevatel'ia [Erosion of coaxial preheater electrodes]. *Tezisy dokladov 9-i Vsesoiuznoi konferentsii po generatoram nizkotemperaturnoi plazmy, Frunze, 20–22 oktiabria 1983*, g. Frunze, 1983, pp. 140–141.

17. Leskov G.I. Elektricheskai svarochnai duga [Electric arc welding]. Moscow: Mashinostroenie, 1970, 336 p.

18. Rakhovskii V.I. Fizicheskie osnovy kommutatsii elektricheskogo toka v vakuume [Physical basics of switching electric current in vacuum]. M.: Nauka, 1970, 536 p.

19. Granovskii L.G. Elektricheskii tok v gase. Ustanovivshis'ia tok [Electric current in gas]. Moscow: Nauka, 1971, 543 p.

20. Uriukov B.A. Teoriia erozii elektrodov v nestatsionarnykh elektrodnykh piatnakh elektricheskoi dugi [Theory of electrode erosion in non-stationary electrode spots of the electric arc]. *Izvestiia SO AN SSSR. Serii tekhnicheskie nauki*, 1975, no. 8, iss. 2, pp. 31–30.

Получено 30.07.2020

Опубликовано 12.10.1010

Сведения об авторах

Щицын Юрий Дмитриевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, завкафедрой сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: svarka@pstu.ru.

Щицын Владислав Юрьевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, инженер кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: svarka@pstu.ru.

Неулыбин Сергей Дмитриевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, научный сотрудник Института механики сплошных сред, филиала Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения РАН, e-mail: sn-1991@mail.ru.

Никулин Роман Германович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: nikromonger.ro@gmail.com.

Никулина Светлана Геннадьевна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры сварочного производства,

метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: Nikulina.sv@mail.ru.

Карупасами Пулан Карунакара Пупати – профессор, кандидат наук лаборатории быстрого производства Индийского технологического института, e-mail: karuna@iitb.ac.in.

About the authors

Yuri D. Shitsyn (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Welding Production, Metrology and Material Technologies, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: svarka@pstu.ru.

Vladislav Yu. Shitsyn (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Engineer, Department of Welding Production, Metrology and Material Technologies, Perm

National Research Polytechnic University, e-mail: svarka@pstu.ru.

Sergey D. Neulybin (Perm, Russian Federation) – Ph.D in Technical Science, Researcher, Institute of Continuous Mechanics, a branch of Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the RAS, e-mail: sn-1991@mail.ru.

Roman G. Nikulin (Perm, Russian Federation) – Ph.D Student, Department of Welding Production, Metrology and Material Technologies, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: nikromonger.ro@gmail.com.

Svetlana G. Nikulina (Perm, Russian Federation) – Master Student, Department of Welding Production, Metrology and Material Technologies, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: Nikulina.sv@mail.ru.

Karupasami Pulan Karunakara Pupati – Professor, Ph.D., Rapid Production Laboratory, Indian Institute of Technology, e-mail: karuna@iitb.ac.in.