

УДК 621.791.755

**Ю.Д. Щицын, Д.С. Белинин, С.Д. Неулыбин,
И.А. Гилев, А.И. Панов**

Пермский национальный исследовательский политехнический
университет, г. Пермь, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАДЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА АНОДНОМ УЧАСТКЕ ДУГИ ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ

Тепловложение в электрод плазматрона и изделие определяется приэлектродными процессами и теплопередачей от сжатой дуги. Процессы, происходящие на электродах и в приэлектродных областях, сложны и недостаточно изучены до сих пор. В представленной работе сделана попытка оценить величину падения напряжения на анодном участке дуги при работе плазматрона на токе обратной полярности. Получен большой массив экспериментальных данных. Для этого были проведены сравнительные исследования тепловложения в анод плазматрона разной конструкции. Представлены результаты определения падения напряжения на анодном участке дуги при плазменной обработке металлов. Предложено обоснование определения падения напряжения на анодном участке дуги с использованием измерения тепловложения в анод плазматрона. Определена величина падения напряжения на анодном участке дуги для токов в диапазоне 50–300 А. Подтверждено предположение, что материал анода практически не влияет на анодное падение напряжения. Полученные значения анодного падения напряжения (U_a) пригодны для определения теплопередачи при проведении оценочных расчетов работы анодов плазматронов и эффективности нагрева изделия.

Ключевые слова: плазматрон, плазменная дуга, анод, анодный участок, падение напряжения, тепловложение, теплопередача, калориметрирование.

Y.D. Schitcyn, D.S. Belinin, S.D. Neulybin, I.A. Gilev, A.I. Panov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

DETERMINATION OF VOLTAGE DROP ACROSS THE ANODE AREA ARC PLASMA PROCESSING OF METALS

Heat input to the electrode of the plasma torch and the product is determined by the near-electrode processes and heat transfer from the compressed arc. Processes occurring at the electrodes and electrode regions are complex and not sufficiently studied so far. In the present study attempted to estimate the magnitude of the voltage drop across the anode portion of the arc plasma torch at work on the current reverse polarity. Received a large amount of experimental data. This was carried out comparative studies of heat input to the anode of the plasma torch of different designs. The results of de-

termining the voltage drop across the anode portion of arc plasma processing of metals. Asked to determine the rationale for the voltage drop across the anode portion of the arc using the measurement of heat input to the anode of the plasma torch. The magnitude of the voltage drop across the anode portion of the arc for the currents in the range of 50-300 A. The assumption that the anode material has virtually no effect on the anode voltage drop. The obtained values of the anode voltage drop (u_a) suitable for determining the heat transfer during the estimations of work anode plasma torches and heating efficiency of the product.

Keywords: plasma torch, plasma arc, the anode, the anode section, voltage drop, heat input, heat transfer, calorimetry.

Тепловложение в электрод плазмотрона и изделие определяется приэлектродными процессами и теплопередачей от сжатой дуги [1–3]. Процессы, происходящие на электродах и в приэлектродных областях, сложны и недостаточно изучены до сих пор.

Для плазменных процессов, выполняемых на токе прямой полярности, анодом является изделие, на токе обратной полярности – электрод плазмотрона. Теплопередача в изделие определяет эффективность процесса обработки, теплопередача в электрод плазмотрона – ресурс работы последнего. Зная падение напряжения на анодном участке дуги, можно определить теплопередачу в анод [4]:

$$N_a = I_d (u_a + \varphi_a),$$

где N_a – тепловая мощность, передаваемая аноду, Вт; I_d – ток дуги, А; u_a – анодное падение напряжения, В; φ_a – работа выхода электрона из материала анода, эВ.

Однако определить реальное тепловложение в анод по предлагаемому выражению сложно, поскольку точные значения u_a не определены. Величина u_a , по разным источникам, может быть в пределах 3–12 В. Исследователи отмечают малую зависимость u_a от материала анода.

Падение напряжения на анодном участке дуги можно определить по результатам оценки баланса теплообмена на электроде-аноде [5]. Тепловой баланс на электроде-аноде плазмотрона складывается из следующих составляющих (рис. 1).

Подвод энергии к аноду плазмотрона осуществляется:

- энергией электронов (работа выхода);
- кинетической энергией электронов дуги за счет соударения с поверхностью анода;
- теплоотдачей от дуги излучением.

Потери энергии с поверхности анода состоят:

- из тепла, отводимого теплопроводностью через анод q_λ ;
- тепла, отдаваемого анодом в окружающую среду излучением и конвекцией.

Внутренний источник тепловыделения $q_0(R)$ отсутствует. Процессы теплообмена на аноде плазмотрона (и на изделии) сосредоточены практически на его торцевой части [6].

Существенно снижается роль радиационного и конвективного теплообмена с окружающей обстановкой, в том числе и с внутренней поверхностью плазмообразующего сопла [7]. Излучение с поверхности анода при $T \leq 1353$ К (температура плавления меди) при $\epsilon = 1$ не превышает $q_1 \leq 1,9 \cdot 10^{-2}$ кВт/см², что является пренебрежимо малой величиной. В действительности, температура анода вблизи рабочей зоны не превышает 623 К [4, 8]. По причине низкой температуры анода, сосредоточенности активного пятна вблизи осевой части торца анода, с учетом структуры газовых потоков в плазмотроне можно отметить малое влияние конвективного теплообмена на общий тепловой баланс на аноде [9]. В итоге уравнение теплового баланса на аноде предельно упрощается:

$$I_d(u_a + \phi_a) = q_\lambda.$$

Таким образом, измерив теплопередачу в анод, можно с достаточной для инженерных расчетов точностью определить u_a .

В представленной работе сделана попытка оценить величину падения напряжения на анодном участке дуги при работе плазмотрона на токе обратной полярности. Для этого были проведены сравнительные исследования тепловложения в анод плазмотрона разной конструкции. Использовался медный водоохлаждаемый анод (рис. 2, а) и медный анод с глухо заделанным вольфрамовым прутком (рис. 2, б).

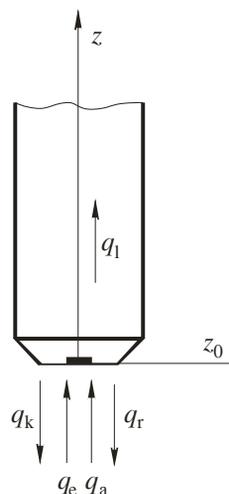


Рис. 1. Тепловой баланс на электроде-аноде: q_a – тепловой поток от анодной области; q_e – тепловой поток работы выхода электронов; q_λ – тепловой поток, отводимый теплопроводностью; q_k – тепловой поток, отводимый конвекцией; q_r – тепловой поток отводимый радиацией

В качестве изделия использовался водоохлаждаемый медный имитатор [1, 4].

Измерение тепловложения в электрод-анод плазмотрона проводили методом калориметрирования [1].

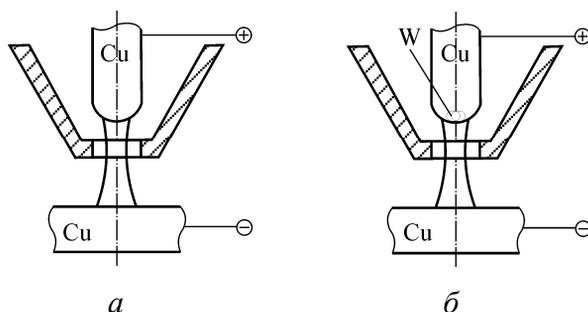


Рис. 2. Схема проведения исследований

В процессе исследований ток дуги I_d изменялся в пределах 50–300 А, диаметр сопла $d_c = 3...6$ мм, расстояние от электрода до изделия $h_{э-и} = 5$ мм, расход газа $Q_{п} = 2...5$ л/мин, расстояние от сопла до изделия $h_{с-и} = 5...10$ мм.

Получен большой массив экспериментальных данных, полное представление которого в данной статье не представляется целесообразным.

Ниже представлены сравнительные результаты исследований. Сравнение проводится при одинаковых параметрах режимов. Величина тепловложения N_a в анод и соотношение падений напряжений на дуге и ее участках для вариантов рис. 2, а и б близки. Решающим фактором, определяющим теплопередачу в анод, являлся ток дуги, остальные параметры (диаметр плазмообразующего сопла, расход плазмообразующего газа, расстояние от плазмотрона до изделия) не оказали заметного влияния.

Зная N_a и φ_a , можно определить падение напряжения на анодном участке дуги. Работа выхода электронов для меди составляет 3,2 эВ, для активированного вольфрама – 2,6–2,8 эВ [10]. Для диапазона токов 50–150 А u_a находится в пределах 1,5–2,5 В, для токов 160–300 А – в пределах 3–4 В. Полученные значения u_a вполне пригодны для определения теплопередачи при проведении оценочных расчетов работы анодов плазмотронов и эффективности нагрева изделия.

Сделаем следующие выводы:

1. Предложено обоснование определения падения напряжения на анодном участке дуги при помощи измерения тепловложения в анод плазмотрона.

2. Определена величина падения напряжения на анодном участке дуги для токов в диапазоне 50–300 А.

3. Подтверждено предположение, что материал анода практически не влияет на анодное падение напряжения.

4. Полученные значения u_a пригодны для определения теплопередачи при проведении оценочных расчетов работы анодов плазмотрона и эффективности нагрева изделия.

Работа выполнена в рамках проектной части госзадания № 11.1196.2014/К при поддержке Министерства образования и науки РФ.

Список литературы

1. Щицын Ю.Д., Косолапов О.А., Щицын В.Ю. Возможности плазменной обработки металлов током обратной полярности // Сварка и диагностика. – 2009. – № 2. – С. 42–45.

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

3. Исхаков Г.Г., Гапченко М.Н., Фесан В.П. Тепловой баланс микроплазменной дуги обратной полярности при сварке тонколистовых алюминиевых сплавов // Сварочное производство. – 1981. – № 1. – С. 2–4.

4. Щицын Ю.Д., Косолапов О.А. Влияние полярности на тепловые нагрузки плазмотрона // Сварочное производство. – 1997. – № 3. – С. 23–25.

5. Щицын Ю.Д. Плазменные технологии в сварочном производстве. Ч. 1 / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2004. – 73 с.

6. Пузряков А.Ф. Новые разработки и перспективы использования плазменных технологий // Сварочное производство. – 1997. – № 2. – С. 21–25.

7. Редчиц А.В., Овчинников В.В. Повышение энергетической эффективности плазменной сварки // Сварочное производство. – 2004. – № 8. – С. 21–23.

8. Щицын В.Ю., Язовских В.М. Влияние полярности на тепло-вложение в сопло плазмотрона // Сварочное производство. – 2002. – № 1. – С. 17–19.

9. Особенности теплопередачи в изделие при работе плазмотрона на токе обратной полярности / Ю.Д. Щицын, Д.С. Белинин, С.Д. Неулыбин, П.С. Кучев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2014. – Т. 16, № 2. – С. 42–50.

10. Эсибян Э.М. Плазменно-дуговая аппаратура. – Киев: Техника, 1971. – 164 с.

References

1. Shchitsyn Yu.D., Kosolapov O.A., Shchitsyn V.Yu. Vozmozhnosti plazmennoi obrabotki metallov tokom obratnoi poliarnosti [The possibility of plasma treatment of metals by current of reverse polarity]. *Svarka i Diagnostika*, 2009, no. 2, pp. 42-45.

2. Bykhovskii D.G., Beliaev V.M. Energeticheskie kharakteristiki plazmennoi dugi pri svarke na obratnoi poliarnosti [Energy characteristics of plasma arc when welding with reverse polarity]. *Avtomaticheskaia svarka*, 1971, no. 5, pp. 27-30.

3. Iskhakov G.G., Gapchenko M.N., Fesan V.P. Teplovoi balans mikroplazmennoi dugi obratnoi poliarnosti pri svarke tonkolistovykh aliuminievykh splavov [Heat balance microplasma arc of reverse polarity when welding thin sheet aluminum alloys]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1981, no. 1, pp. 2-4.

4. Shchitsyn Iu.D., Kosolapov O.A. Vliianie poliarnosti na teplovye nagruzki plazmotrona [The influence of polarity on the thermal load of the plasma torch]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1997, no. 3, pp. 23-25.

5. Shchitsyn Yu.D. Plazmennye tekhnologii v svarochnom proizvodstve. Ch.1 [Plasma technology in the welding industry. Vol. 1]. *Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet*, 2004. 73 p.

6. Puzriakov A.F. Noveye razrabotki i perspektivy ispol'zovaniia plazmennyykh tekhnologii [New developments and prospects for the use of

plasma technology // Welding production]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1997, no. 2, pp. 21-25.

7. Redchits A.V., Ovchinnikov V.V. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti plazmennoi svarki [Improving the energy efficiency of plasma welding]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2004, no. 8, pp. 21-23.

8. Shchitsyn V.Yu., Iazovskikh V.M. Vliianie poliarnosti na teplovozhenie v soplo plazmotrona [The influence of polarity on the heat input into the nozzle of the plasma torch]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2002, no. 1, pp. 17-19.

9. Shchitsyn Yu.D., Belinin D.S., Neulybin S.D., Kuchev P.S. Osobennosti teploperedachi v izdelie pri rabote plazmotrona na toke obratnoi poliarnosti [Features of heat transfer into the product during operation of the plasma torch at a current of reverse polarity]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroyeniye, materialovedeniye*, 2014, vol. 16, no. 2, pp. 42-50.

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

Получено 06.05.2015

Щицын Юрий Дмитриевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: svarka@pstu.ru.

Белинин Дмитрий Сергеевич (Пермь, Россия) – научный сотрудник кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: 51y87@mail.ru.

Неулыбин Сергей Дмитриевич (Пермь, Россия) – лаборант-исследователь кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: sn-1991@mail.ru.

Гилев Иван Александрович (Пермь, Россия) – магистрант гр. ЛТС-13м механико-технологического факультета Пермского на-

ционального исследовательского политехнического университета;
e-mail: ivan.giliev@mail.ru.

Панов Алексей Иванович – магистрант гр. ЛТС-14м механико-технологического факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета: e-mail: homa2901@gmail.com.

Schitsyn Yuri (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department “Welding Technology and Production of Construction Materials”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: svarka@pstu.ru.

Belinin Dmitry (Perm, Russian Federation) – Researcher, Department “Welding Technology and Production of Construction Materials”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: 5ly87@mail.ru.

Neulybin Sergey (Perm, Russian Federation) – Researcher, Department “Welding Technology and Production of Construction Materials”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: sn-1991@mail.ru.

Gilev Ivan (Perm, Russian Federation) – Master, Mechanical-Technological Faculty, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: ivan.giliev@mail.ru.

Panov Alexey (Perm, Russian Federation) – Master, Mechanical-Technological Faculty, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: homa2901@gmail.com.