

УДК 621.791

**Ю.Д. Щицын, Д.С. Белинин, П.С. Кучев, С.Д. Неулыбин**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

**ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ИЗДЕЛИЕ ПРИ РАБОТЕ  
ПЛАЗМОТРОНА НА ТОКЕ ОБРАТНОЙ ПОЛЯРНОСТИ**

Представлены результаты исследования влияния полярности тока на механизм теплопередачи в изделие при плазменном нагреве. Установлено количественное соотношение передаваемой изделию мощности между плазменным потоком и приэлектродными процессами на поверхности изделия.

**Ключевые слова:** плазмотрон, плазменные технологии, обратная полярность тока, прямая полярность тока, тепловложение, приэлектродные процессы.

**Y.D. Shicin, D.S. Belinin, P.S. Kuchev, S.D. Neulybin**

Perm National Research Polytechnic University

**FEATURES OF HEAT TRANSFER TO THE PRODUCT  
WHEN WORKING ON THE PLASMA TORCH CURRENT  
OF REVERSED POLARITY**

The effect of current polarity on the mechanism of heat transfer in the product during the plasma heating. The quantitative ratio of transmitted power between the product and the plasma flow near the electrode processes at the surface of the product.

**Keywords:** plasma torch, plasma technology, reverse polarity current, direct current polarity, heat input, near-electrode processes.

Большая часть плазменных технологий применяется при работе плазмотрона на токе прямой полярности. Предполагается, что при работе на токе обратной полярности плазмотроны испытывают повышенные тепловые нагрузки, что приводит к усложнению конструкций плазмотронов, увеличению их габаритов и массы.

Использование обратной полярности обеспечивает дополнительные преимущества для ряда плазменных технологий. Явление катодного распыления позволяет проводить очистку поверхностей металлических заготовок, решает проблему качественной сварки алюминиевых

и магниевых сплавов. Ведение процессов на токе обратной полярности позволяет в широких пределах регулировать тепловое и силовое воздействие на зону обработки, что особенно важно для таких процессов, как наплавка и поверхностная термообработка.

Вопросам тепловложения в изделие при плазменной сварке, особенно при работе плазмотрона на прямой полярности, посвящено достаточное количество работ [1–5]. Выявлены основные факторы, влияющие на эффективный КПД процесса  $\eta_{и}$ . При совпадении в качественной оценке влияния параметров режима на  $\eta_{и}$  результаты различных исследователей имеют значительное расхождение в количественных показателях. Это объясняется различием конструкций плазмотронов, разнообразием методик, оборудования и регистрирующих приборов для определения тепловложения в изделие, значительными отличиями условий проведения исследований (диапазон мощности сжатой дуги, степень обжата дуги, технологические особенности и др.).

При работе плазмотрона на токе прямой полярности распределение мощности по пятну нагрева подчиняется закону нормального распределения Гаусса. При таком распределении максимальная мощность сосредоточена в центре пятна нагрева и при достаточных значениях тока дуги вызывает подплавление обрабатываемой поверхности, что не всегда необходимо. Зона контакта дуги с обрабатываемой поверхностью при работе плазмотрона на токе прямой полярности представляет собой анодное пятно, размеры которого определяются диаметром плазмообразующего сопла плазмотрона.

На первом этапе работы выполнены сравнительные исследования энергетических характеристик сжатой дуги при работе на токах прямой и обратной полярности. Методом калориметрирования оценивалась общая тепловая мощность, вводимая в изделие при работе плазмотрона на прямой и обратной полярности при изменении тока дуги, расхода плазмообразующего газа и диаметра плазмообразующего сопла.

По результатам выполненных исследований установлено, что при одинаковом токе и прочих равных условиях тепловложение в изделие выше при работе плазмотрона на обратной полярности, чем на прямой, вследствие большего напряжения дуги, при этом с уменьшением диаметра сопла  $d_c$  эта разница растет:  $P_{и\text{ ОП}} \approx (1,1 \dots 1,6) P_{и\text{ ПП}}$  (рис. 1).

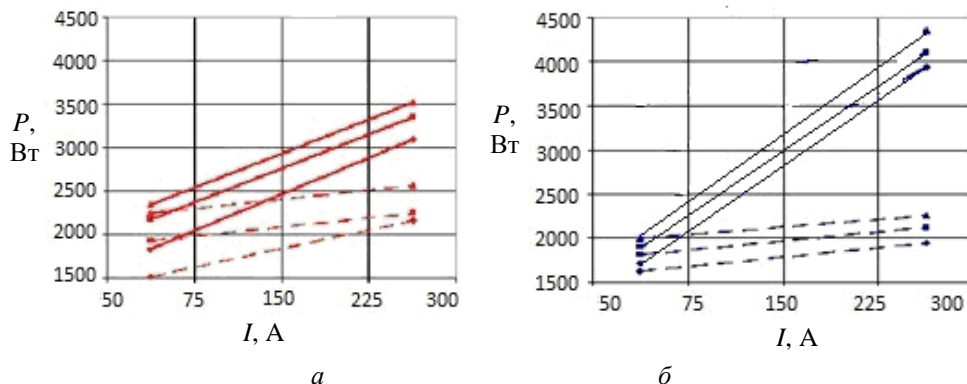


Рис. 1. Тепловложение в изделие при работе плазмотрона на токах прямой (---) и обратной (—) полярности в зависимости от диаметра плазмообразующего сопла и расхода плазмообразующих газов: *a* –  $d_c = 5$  мм; *б* –  $d_c = 3$  мм;  $Q_n = 2$  (●), 4 (■), 6 (▲) л/мин

В отличие от плазменной дуги прямой полярности плазменная дуга обратной полярности характеризуется более равномерным распределением тепловой мощности по поверхности изделия. Достигается это следующим образом: при работе плазмотрона в режиме дуги прямого действия обратной полярности обрабатываемое изделие является холодным катодом, а дуга относится к типу дуг с нестационарными катодными пятнами, блуждающими по его поверхности. Одной из отличительных особенностей нестационарных пятен является кратковременность их существования и большая плотность тока в них ( $j \sim 10^5 \dots 10^6$  А/см<sup>2</sup>), при этом удельные тепловые потоки достигают значений  $q \sim 10^6 \dots 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> [6].

В работе предлагается принять во внимание, что теплопередача в изделие в зависимости от полярности определяется приэлектродными процессами и передачей тепла плазменным потоком и может быть представлена в виде:

$$P_k = I_d(u_k - \varphi_b) + P_n,$$

$$P_a = I_d(u_a - \varphi_b) + P_n,$$

где  $I_d$  – ток дуги;  $u_k$  – катодное падение напряжения;  $u_a$  – анодное падение напряжения;  $\varphi_b$  – работа выхода;  $P_n$  – мощность, передаваемая изделию плазменным потоком.

Для оценки величины мощности, передаваемой изделию потоком плазмы, для работы плазмотрона на прямой и обратной полярности

и влияния технологических параметров ( $I_d$ ,  $d_c$ ,  $Q_n$ ) можно сделать следующие допущения. При определении  $P_n$  для работы на прямой полярности слагаемое  $I_d(u_a + \varphi_b)$  можно взять из результатов экспериментов по определению тепловложения в анод плазматрона при работе на токе обратной полярности.

С целью получения достоверных и более точных данных была использована комбинация схем и методика проведения эксперимента, предлагаемая в работе [7].

Целью эксперимента являлось получение данных о зависимости напряжения сжатой дуги от параметров процесса при работе плазматрона на прямой и обратной полярности и исследование изменения катодного и анодного падений напряжений в зависимости от материала катода и анода, а также оценка влияния полярности на тепловые нагрузки плазматрона и теплоотдачу в изделии. В качестве основных факторов были выбраны следующие технологические параметры: сила тока, расход плазмообразующего газа и геометрические параметры – диаметр сопла  $d_c$  и расстояние от электрода до сопла  $h_{э-с}$ .

Проведенные исследования показали, что при работе плазматрона на токе обратной полярности напряжение на дуге  $U_d$  значительно выше, чем при работе на токе прямой полярности,  $U_{d\text{ ОП}} \approx (1,1 \dots 1,5) U_{d\text{ ПП}}$  ( $U_{d\text{ ОП}}$  – падение напряжения на сжатой дуге при работе плазматрона на обратной полярности,  $U_{d\text{ ПП}}$  – падение напряжения на сжатой дуге при работе плазматрона на прямой полярности).

Сравнение падений напряжений на дуге производится между схемами (рис. 2), сгруппированными по ряду признаков. Причем падение напряжения на различных участках сжатой дуги при работе на токах прямой и обратной полярности при прочих равных условиях сильно различаются: падение напряжения на части столба дуги, расположенной внутри плазматрона, значительно больше при работе на токе обратной полярности:  $U_{э-с\text{ ОП}} \approx (2,5 \dots 3,8) U_{э-с\text{ ПП}}$ , а падение напряжения на внешней части столба дуги, наоборот, больше при работе на токе прямой полярности:  $U_{с-и\text{ ПП}} \approx (1,4 \dots 2,5) U_{с-и\text{ ОП}}$ .

Причиной выявленного распределения падений напряжения на различных участках сжатой дуги при смене полярности предположительно можно считать различную степень сжатия дуги, что ведет к изменению напряженности электрического поля столба дуги и соответственному изменению падений напряжения. Особенно это относится

к части столба дуги, расположенной внутри плазматрона. При работе плазматрона на обратной полярности степень сжатия столба дуги выше. Причиной этого является изменение характеристик вихревого потока плазмообразующего газа при изменении геометрии вихревой (плазмообразующей) камеры плазматрона ввиду разных размеров электродов. При работе плазматрона на обратной полярности вследствие меньших проходных сечений зазора «электрод – сопло» скорость истечения плазмообразующего газа выше при равных расходах – значит, и выше обжатие дуги.

Из графиков рис. 2, 3 видно, что материал анода не оказывает влияния на анодное падение напряжения  $U_a$ .

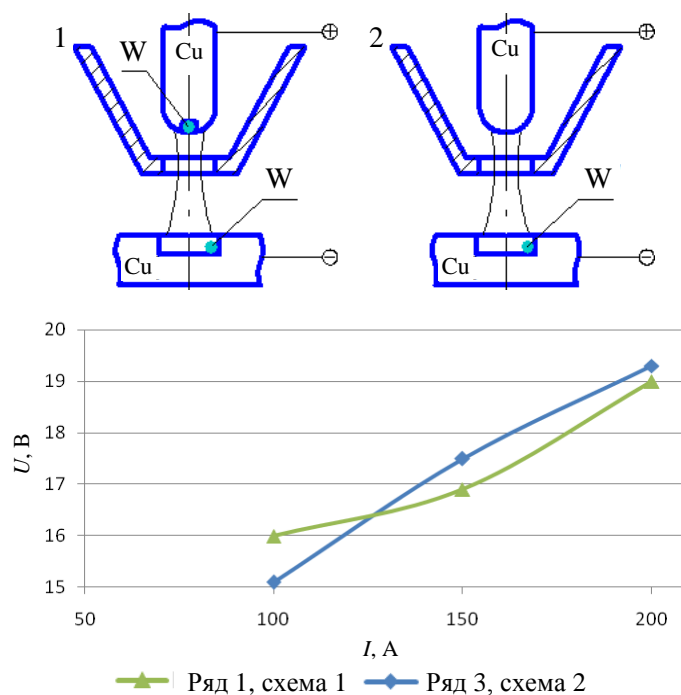


Рис. 2. Распределение падения напряжения на участке сжатой дуги внутри плазматрона в зависимости от тока дуги при работе плазматрона обратной полярности ( $d_c = 5$  мм,  $h_{с-и} = 5$  мм,  $Q_{п} = 4$  л/мин)

Необходимо отметить, что полученные в ходе исследований данные об изменении катодного падения напряжения в зависимости от материала катода и тот факт, что материал анода не оказывает влияния на анодное падение напряжения, хорошо согласуются с установленными зависимостями [8].

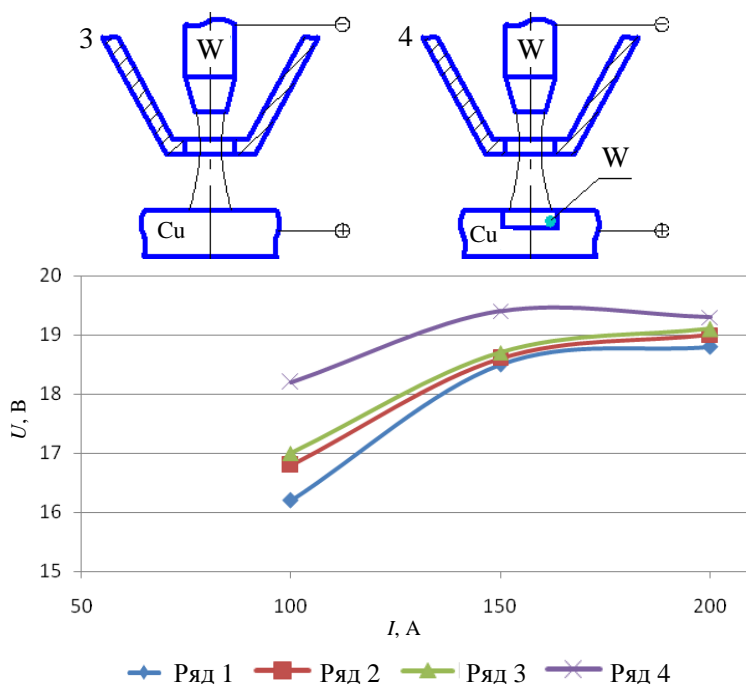


Рис. 3. Распределение падения напряжения на внешней части столба дуги в зависимости от тока дуги при работе плазматрона на прямой полярности ( $h_{c-и} = 5$  мм,  $Q_{п} = 4$  л/мин). Ряд 1 –  $d_c = 3$  мм, схема 3; ряд 2 –  $d_c = 5$  мм, схема 3; ряд 3 –  $d_c = 3$  мм, схема 4; ряд 4 –  $d_c = 5$  мм, схема 4

Установлено, что тепловая мощность, передаваемая изделию плазменным потоком, составляет 55–60 % всей мощности, передаваемой изделию сжатой дугой (рис. 4).

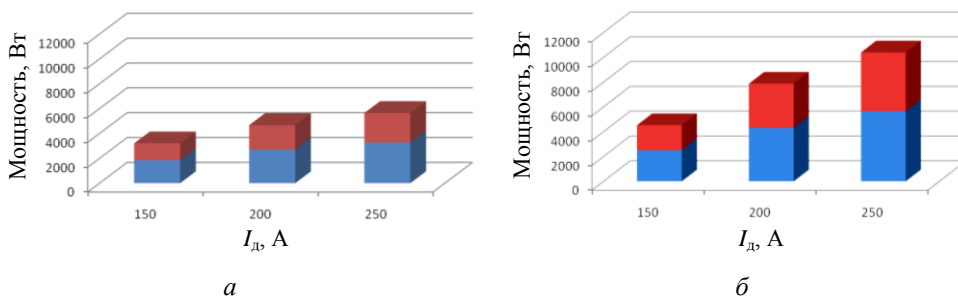


Рис. 4. Тепловложение в изделие различными механизмами при работе плазматрона на токе обратной полярности в зависимости от диаметра плазмообразующего сопла и расхода плазмообразующего газа ( $d_c = 6$  мм (а),  $d_c = 3$  мм (б),  $Q_{п} = 4,7$  л/мин);

- – мощность передаваемая плазменным потоком;
- – мощность передаваемая за счет катодных пятен

Величина мощности, вводимой в изделие за счет катодных процессов, определяется значением силы тока дуги. Величиной  $P_{\text{п}}$  можно активно управлять, изменяя параметры режима  $I_{\text{д}}$ ,  $d_{\text{с}}$ ,  $Q_{\text{п}}$ . Таким образом, при работе плазмотрона на токе обратной полярности можно активно управлять эффективностью процесса, изменяя параметры режима. Причем при одинаковых режимах при работе плазмотрона на обратной полярности величина  $P_{\text{п}}$  в 1,2–1,5 раза больше, чем при работе на прямой полярности. Величиной  $P_{\text{п}}$  можно активно управлять, изменяя параметры режима  $I_{\text{д}}$ ,  $d_{\text{с}}$ ,  $Q_{\text{п}}$ .

Таким образом, при работе плазмотрона на токе обратной полярности можно активно управлять эффективностью процесса, изменяя параметры режима. Механизм теплопередачи в изделие за счет приэлектродных процессов существенно различается для токов прямой и обратной полярности. Для прямой полярности зона контакта дуги с изделием представляет собой стационарное анодное пятно, а для тока обратной полярности – совокупность блуждающих нестационарных катодных пятен. Таким образом, при работе плазмотрона на токе обратной полярности имеют место два источника нагрева – это поток плазмы и тепловыделение в нестационарных катодных пятнах, блуждающих по поверхности изделия. При этом площадь блуждания катодных пятен ограничена и определяется рядом факторов (сварочный ток, расход защитного газа, скорость перемещения плазмотрона).

### Список литературы

1. Оптимизация технологических параметров процесса сварки стабилизированной дугой обратной полярности / С.И. Полосков, В.А. Букаров, И.А. Бурлаков, Т.А. Дорина // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Сварка в ядерной технологии. – 1988. – Вып. 1 (20). – С. 19–25.
2. Хурцидзе Г.С., Дудко Д.А., Кирниенко А.Н. Тепловая эффективность дуги, сжатой радиальным потоком газа // Автоматическая сварка. – 1978. – № 8. – С. 67–68.
3. Демянцевич В.П., Михайлов Н.П. Составляющие теплового баланса микроплазменной дуги // Автоматическая сварка. – 1973. – № 1. – С. 25–27.

4. Разработка плазмотрона и технологии плазменной сварки высокопрочной стали / В.А. Малаховский, В.А. Стихин, В.Г. Крутиковский, Ю.А. Попков // Сварочное производство. – 1985. – № 1. – С. 13–15.

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

6. Жуков М.Ф., Аньшаков А.С., Дандарон Г.-Н.Б. Эрозия электродов // Приэлектродные процессы и эрозия электродов плазмотронов / Ин-т теплофизики СО АН СССР. – Новосибирск, 1977. – 123 с.

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

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

Получено 25.04.2014

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

**Белинин Дмитрий Сергеевич** (Пермь, Россия) – ассистент кафедры «Сварочное производство и технологии конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: 5ly87@mail.ru

**Кучев Павел Сергеевич** – ассистент кафедры «Сварочное производство и технологии конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: kuchev.p@gmail.com

**Неулыбин Сергей Дмитриевич** – инженер кафедры «Сварочное производство и технологии конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: sn-1991@mail.ru



**Shicin Yuri Dmitrievich** (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 Sergeevich** (Perm, Russian Federation) – Assistant, Department “Welding technology and production of construction materials”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: 51y87@mail.ru

**Kuchev Pavel Sergeevich** (Perm, Russian Federation) – Assistant, Department “Welding technology and production of construction materials”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: kuchev.p@gmail.com

**Neulybin Sergei Dmitriyevich** (Perm, Russian Federation) – Engineer, Department “Welding technology and production of construction materials”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: sn-1991@mail.ru