



НАГРЕВ ПЛАЗМЕННОЙ ДУГОЙ ПЛОСКОГО ЭЛЕКТРОДА, АКСИАЛЬНО ПОДАВАЕМОГО В ПЛАЗМОТРОН

В. В. ЧИГАРЕВ, д-р техн. наук, **К. А. КОНДРАШОВ**, **Н. А. МАКАРЕНКО**, кандидаты техн. наук, **Н. А. ГРАНОВСКИЙ**, асп. (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

Изучены особенности нагрева плоского электрода (порошковой плющенко) внутри плазмотрона теплом плазменных дуг в процессе плазменной наплавки комбинированным способом. Установлено, что применение импульсного режима горения плазменных дуг, при котором плоский электрод периодически становится катодом по отношению к неплавящемуся электроду плазмотрона, повышает эффективность его нагрева. Однако при этом увеличивается склонность процесса к шунтированию плазменных дуг плоским электродом.

Ключевые слова: плазменная наплавка, комбинированный способ, плазменная дуга, тепловложение в плоский электрод, импульсный режим, двойное дугообразование, шунтирование плазменной дуги, активные катодные пятна дуги

Плазменная наплавка комбинированным способом, имеющая ряд преимуществ перед другими способами наплавки (возможность визуально контролировать процесс; высокая производительность наплавленного металла [1]; малая глубина проплавления основного металла, позволяющая получать металл заданного химического состава уже в первом наплавленном слое и, тем самым, сэкономить дорогостоящие легированные стали, сплавы и цветные металлы; относительно низкая погонная энергия [2]), обуславливает незначительные термические деформации наплаваемого изделия, снижает риск структурных изменений в основном металле и уменьшает в нем остаточные напряжения.

Проведенные исследования [3] позволили разработать ряд порошковых проволок [4] для использования при плазменной наплавке комбинированным способом. В то же время процесс плазменной наплавки комбинированным способом с применением в качестве плавящегося электрода порошковой плющенко в настоящее время изучен недостаточно, что препятствует его внедрению, несмотря на ряд достоинств: более высокую производительность; возможность регулирования геометрических размеров наплавленного валика и проплавления основного металла за счет изменения расположения плоскостей плющенко относительно вектора скорости наплавки; возможность проведения наплавки изделий из алюминия и его сплавов, для которых изготовление порошковой проволоки, имеющей мягкую непрочную алюминиевую оболочку, проблематично.

Одной из важнейших задач исследований в этом направлении является изучение процессов нагрева [5] порошковой плющенко теплом плаз-

менной дуги. Нагрев плазменной дугой оболочки порошковой плющенко приводит к изменению ее удельного электрического сопротивления, что повышает в ней выделение тепла от проходящего тока собственной дуги. В свою очередь, увеличение температуры оболочки порошковой плющенко ведет к повышению скорости ее плавления, меняет характер массопереноса, влияет на процессы, происходящие в сердечнике порошковой плющенко.

Целью исследований, проведенных кафедрой металлургии и технологии сварочного производства Приазовского государственного технического университета, было установление закономерностей нагрева плоского плавящегося электрода (порошковой плющенко) плазменной дугой при плазменной наплавке комбинированным способом (плавящимся и неплавящимся электродами).

В работе [6] предложен способ определения нагрева плавящегося электрода теплом плазменной дуги при плазменно-дуговой сварке плавящимся электродом, однако этот способ пригоден лишь для оценочной характеристики процесса нагрева и является весьма неточным, на что указывают авторы.

Предложенный ранее способ определения нагрева плавящегося электрода [7] позволяет определить нагрев на различных участках горения плазменной дуги: предсопловом, внутри плазмобразующего канала сопла, на участке видимого вне плазмотрона вылета, а также определить начало процесса шунтирования плазменной дуги плавящимся электродом. Несмотря на достаточную точность способа, он пригоден только для случая применения плавящегося электрода кругового сечения — проволоки. Применение в качестве плавящегося электрода порошковой плющенко, имеющей сечение, близкое к прямоугольному, изменяет условия горения плазменной дуги [8], характер плавления электрода, что делает спо-

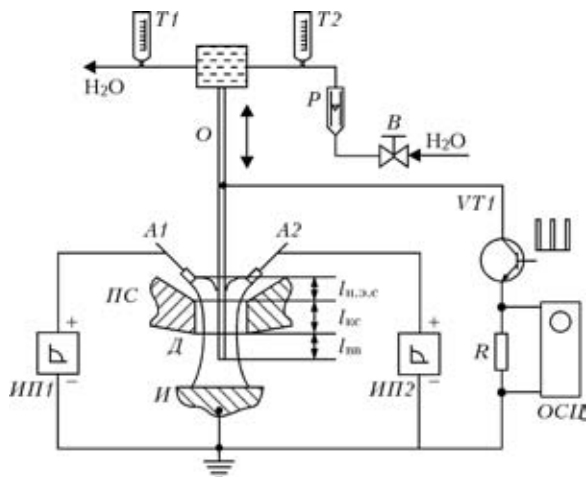


Рис. 1. Схема установки для определения нагрева плавящегося электрода теплом плазменных дуг: $T1, T2$ — термометры; P — ротаметр; B — вентиль; $И$ — изделие; $Д$ — плазменная дуга; $A1, A2$ — аноды плазмотрона; $ИП1, ИП2$ — источники питания плазменных дуг; R — резистор; $ОСЦ$ — осциллограф

соб, предложенный в работе [7], непригодным для исследования нагрева плоского электрода теплом плазменной дуги.

Следует отметить, что применение для наплавки импульсных режимов горения дуги плавящегося электрода, при которых он периодически становится катодом по отношению к неплавящимся электродам плазмотрона [8], ведет к появлению на поверхности плавящегося электрода дополнительных источников нагрева: катодных пятен дуг «плавящийся электрод — неплавящиеся электроды».

В связи с этим возникла необходимость разработать новую методику исследований нагрева плоского плавящегося электрода при плазменной наплавке комбинированным способом, учитывающую перечисленные выше факторы и позволяющую изучить процесс нагрева плоского плавящегося электрода при плазменной наплавке комбинированным способом.

Исследования проводили на установке, функциональная схема которой представлена на рис. 1, методом измерения количества тепла, попадающего в плоский образец-имитатор O сечением 3×6 мм при его нагреве, на различных участках плазменной дуги. Имитатор имел возможность перемещения в осевом направлении (на рис. 1 показано стрелкой).

Порошковая плюшенка нагревается теплом плазменной дуги на следующих участках: предсопловом («неплавящиеся электроды — сопло») $l_{н.э.с}$; в плазмообразующем канале сопла плазмотрона $l_{к.с}$ и на участке видимого вылета (вне плазмотрона) $l_{в.в}$.

Тепловую мощность, выделяющуюся в имитаторе, определяли по формуле

$$P = C(T_2 - T_1)q, \quad (1)$$

где P — тепловая мощность; C — удельная теплоемкость воды; q — расход воды в секунду.

Измерения проводили последовательным погружением имитатора в различные зоны дуги. При этом вначале определяли тепловую мощность на участке $l_{н.э.с}$, затем имитатор опускали в канал плазмообразующего сопла (ПС) и вновь определяли тепловую мощность, вводимую в имитатор, затем вычисляли тепловую мощность, вводимую в имитатор в канале ПС по формуле

$$P_{к.с} = P_{01} - P_{н.э.с}, \quad (2)$$

где $P_{к.с}$ — тепловая мощность, вводимая в имитатор в канале ПС $l_{к.с}$; P_{01} — общая тепловая мощность на участках $l_{н.э.с}$ и $l_{к.с}$; $P_{н.э.с}$ — измеренная (в предыдущем эксперименте) мощность, вводимая в имитатор на предсопловом участке $l_{н.э.с}$.

Аналогично вычисляли тепловую мощность, вводимую в имитатор на участке видимого вылета:

$$P_{в.в} = P_{02} - P_{01}, \quad (3)$$

где $P_{в.в}$ — мощность, вводимая в имитатор на участке видимого вылета; P_{02} — общая тепловая мощность, вводимая в имитатор при наличии видимого вылета.

Исследования проводили как в непрерывном, так и в импульсном режиме горения плазменных дуг. При импульсном режиме имитатор через балластный реостат периодически подключался к изделию. При этом в момент импульса он становился катодом по отношению к неплавящимся электродам плазмотрона и на его боковой поверхности возникали активные катодные пятна [8].

Импульсный режим обеспечивался с помощью периодически отпираемого силового транзистора $VT1$. Длительность импульса тока составляла 3, паузы 7 мс, частота следования импульсов 100 Гц.

Как видно из рис. 2, импульс тока имеет форму, близкую к прямоугольной. Передний фронт импульса более пологий, чем задний, что обусловлено индуктивностью сварочных цепей и источника питания. Прямоугольная форма импульса тока свидетельствует о быстром самопроизвольном зажигании дуг «неплавящиеся электроды плазмотрона — плавящийся электрод» и о стабильности процесса горения этих дуг, что позволяет сделать вывод о постоянстве тепловой энергии, вводимой в плоский плавящийся электрод катодными пятнами дуг в течение всего времени прохождения импульса тока.

Изучали также процесс шунтирования плазменной дуги плоским медным образцом. Установлено, что процесс шунтирования в непрерывном режиме начинался при видимом вылете больше, чем в импульсном режиме. Процесс шунти-

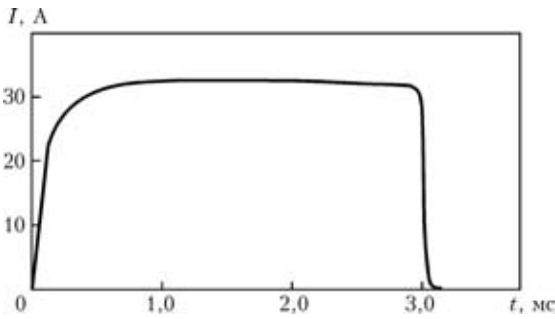


Рис. 2. Форма импульса тока, проходящего через резистор R ($I_{пл1} = I_{пл2} = 90$ А; диаметр плазмообразующего сопла $d_c = 10$ мм; $Q_{Ar} = 5,2$ л/мин; расстояние «сопло–изделие» 14 мм; вылет образца за пределы сопла 3 мм)

рования сопровождался увеличением тепловложения в образец O и оплавлением торца образца. Последнее интенсивнее при импульсном режиме, что свидетельствует о том, что наложение импульсов формирует на поверхности образца активные катодные зоны, которые продолжают существовать и после окончания импульса, облегчая процесс шунтирования плазменных дуг.

Для предсоплового участка была получена зависимость, представленная на рис. 3, *a*, из которой следует, что при импульсном режиме эффективность нагрева плоского электрода выше, чем при непрерывном (кривые 2 и 1 соответственно), что объясняется периодическим появлением на поверхности электрода активных катодных пятен.

В целом возрастание тока плазменных дуг вызывает увеличение теплового потока в порошковую плющенко на предсопловом участке ее нагрева. Эти данные согласуются с описанными в работе [7], характерными для плавящегося электрода круглого сечения. Необходимо отметить, что эффективность нагрева порошковой плющенко даже в непрерывном режиме оказалась несколько выше, чем эффективность нагрева проволоки, исследованная в работе [7], что объясняется несимметричностью порошковой плющенко и нарушением ламинарности газового потока у ее краев (такое нарушение ламинарности потока ведет к более интенсивному теплообмену между плазменной дугой и порошковой плющенко [9]).

С данными работы [7] также согласуются зависимости тепловых потоков в порошковую плющенко на участке «канала сопла» (рис. 3, *б*).

Как и для предсоплового участка эффективность нагрева плоского образца оказалась выше, чем образца круглого сечения. Увеличение теплового потока в образец на участке канала сопла при повышении тока плазменных дуг больше, чем на предсопловом участке, что объясняется сжатием дуги в канале сопла плазмотрона.

В импульсном режиме горения дуги тепловложение в порошковую плющенко на участке $l_{к.с}$ оказывается большим, чем в непрерывном, что не может являться результатом нагрева ее актив-

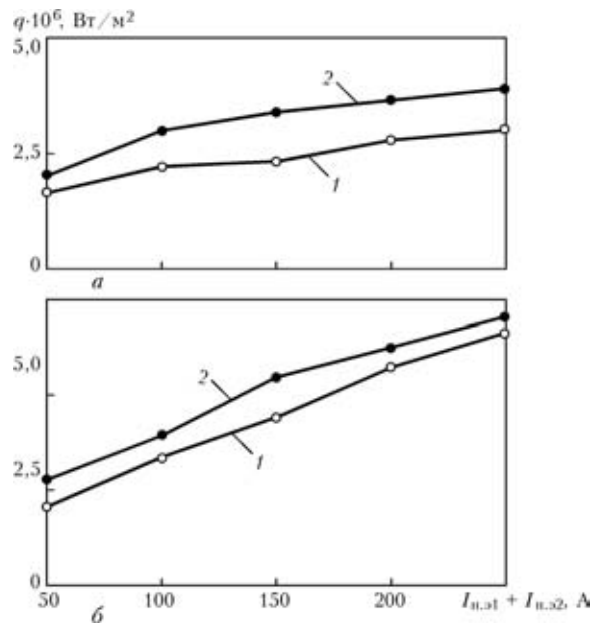


Рис. 3. Зависимость теплового потока в имитатор на участке «неплавящиеся электроды — сопло» (*a*) и плазмообразующего канала сопла (*б*) от суммарного тока неплавящихся электродов при непрерывном (1) и импульсном (2) режиме ($d_c = 10$ мм; $Q_{Ar} = 5,6$ л/мин; $l_{н.э.с} = 5$ мм; $l_{к.с} = 4$ мм)

ными катодными пятнами во время импульсов, так как этот нагрев уже был учтен в исследованиях нагрева порошковой плющенко в предсопловом участке.

Осмотр образца-имитатора после испытаний показал наличие следов эрозии на его торце, а также местных подплавлений торца, что свидетельствует о возникновении дуги между образцом-имитатором и изделием. Таким образом, имеет место шунтирование плазменной дуги при импульсном режиме даже в случае отсутствия вылета образца-имитатора вне плазмотрона.

Процесс шунтирования дуги сопровождается двойным дугообразованием. В этом случае вероятность возникновения двойной дуги описывается принципом минимума Штеенбека, который для данного случая имеет вид

$$U_{н.э.с} + U_{к.с} > U_{а.м} + U_{к.м} + IR_M \quad (4)$$

где $U_{н.э.с}$ — напряжение на участке дуги $l_{н.э.с}$, В; $U_{к.с}$ — напряжение на участке дуги внутри канала плазмообразующего сопла, В; I — ток в имитаторе, А; $U_{а.м}$ — анодное падение напряжения на медном имитаторе, В; $U_{к.м}$ — катодное падение напряжения на медном имитаторе, В.

Учитывая, что $R_M \rightarrow 0$, можно считать

$$U_{н.э.с} + U_{к.с} > U_{а.м} + U_{к.м} \quad (5)$$

Известно [10, 11], что для меди $U_k + U_a = 22...26$ В.

Провести измерения напряжений $U_{н.э.с}$ и $U_{к.с}$ достаточно сложно, так как эти участки дуги находятся внутри плазмотрона. В связи с этим были



проведены измерения напряжений между неплавящимися электродами и зондом, расположенным на выходе плазменной дуги из сопла плазмотрона. В качестве зонда применяли вольфрамовую проволоку диаметром 0,5 мм, непрерывно подаваемую в плазменную дугу. Напряжение регистрировали катодным вольтметром. Результаты измерений показали, что напряжение между анодами плазмотрона и зондом составляет 6...9 В. Из этого напряжения необходимо вычесть 2...3 В прианодного падения напряжения на неплавящемся электроде плазмотрона. Таким образом, согласно принципу минимума Штеенбека, возникновение двойного дугообразования на медном образце-имитаторе невозможно.

В то же время известно [10, 12], что при плазменных процессах, осуществляемых комбинированным способом, между изделием и плавящимся электродом наблюдается слаботочная дуга при электрически нейтральном плавящемся электроде. Возникновение этой дуги, очевидно, связано с самопроизвольным разрядом носителей заряда в плазменной дуге на поверхности плавящегося электрода, вследствие чего между плавящимся электродом и изделием появляется электрический потенциал, приводящий к возникновению слаботочной дуги.

Следует отметить, что возникновение такой дуги существенно облегчается тем, что она горит внутри плазменной дуги, имеющей температуру в 2-3 раза выше, чем дуга плавящегося электрода [12], т. е. существует в условиях внешней принудительной ионизации. При этом с увеличением площади поверхности плавящегося электрода будет возрастать площадь соприкосновения плавящегося электрода с плазменной дугой, что приведет к увеличению количества носителей заряда, разряжающихся на поверхности плавящегося электрода и вызовет возрастание тока дуги между изделием и электрически нейтральным плавящимся электродом. Необходимо отметить, что при таком механизме горения дуги плавящегося электрода на нем будет образовываться лишь одно активное пятно — на торце электрода, роль второго пятна будет выполнять поверхность электрода, погруженная в плазменную дугу. Порошковая плющенко (в отличие от электрода круглого сечения) имеет гораздо большую поверхность по отношению к площади поперечного сечения, в связи с чем описанные выше эффекты при ее применении в качестве плавящегося электрода проявляются намного сильнее, что обуславливает и более высокую эффективность нагрева образца-имитатора плоского сечения.

Однако указанные факторы действуют как при непрерывном, так и при импульсном режимах горения плазменной дуги, в то же время эффективность нагрева плоского имитатора на участке

плазмообразующего канала сопла плазмотрона при импульсном режиме оказывается выше, а его торец имеет следы эрозии и подплавлений. Отмеченные особенности позволяют сделать вывод, что активные катодные пятна на поверхности образца, находящиеся в столбе плазменной дуги, продолжают существовать и после окончания импульса, вследствие чего ток слаботочной дуги возрастает. Следовательно, увеличивается и тепловложение в имитатор. Импульсы тока через имитатор играют роль инициаторов активных катодных пятен на нем, т. е. выступают в роли поджигающих импульсов.

Необходимо отметить, что в имитатор отводится лишь часть тока плазменной дуги, при этом двойное дугообразование не происходит в полной мере, плазменная дуга горит устойчиво с анодов плазмотрона на изделие, т. е. наблюдается лишь частичное шунтирование плазменной дуги.

Известно [10, 11], что на прикатодное падение напряжения оказывает влияние большое количество факторов, в том числе состав газа, материалы анода и катода, наличие в дуге паров металлов.

Учитывая особенности плазменной наплавки комбинированным способом (погружение плавящегося электрода в столб плазменной дуги, являющейся мощным источником внешней ионизации), можно предположить, что в этих условиях прикатодное падение напряжения на медном имитаторе окажется значительно ниже, чем приведенное в работах [10, 11], характеризующее процесс аргонодуговой сварки. В этом случае процессы шунтирования дуги будут протекать более интенсивно.

Изучено тепловложение в медный имитатор при наличии видимого (вне плазмотрона) вылета. Зависимость тепловложения в имитатор от суммарного тока неплавящихся электродов плазмотрона представлена на рис. 4. Как видно из рисунка, интенсивное шунтирование плазменной дуги при непрерывном процессе и вылете 8 мм начинается на токах более 120 А (этому соответствует быстрое увеличение теплового потока в имитатор). При применении импульсного режима процессы шунтирования интенсивно нарастают при токах плазменной дуги 105 А, при этом с возрастанием тока тепловложение в имитатор увеличивается намного быстрее, чем при применении непрерывного режима. Следует отметить, что тепловой поток в плоский имитатор в непрерывном режиме оказывается большим, чем в электрод круглого сечения, а шунтирование дуги наступает при меньших токах плазменной дуги, чем это описано в работе [7].

Полученные данные подтверждают изложенное выше предположение о механизме шунтирования плазменной дуги при плазменной наплавке комбинированным способом с применением в качестве

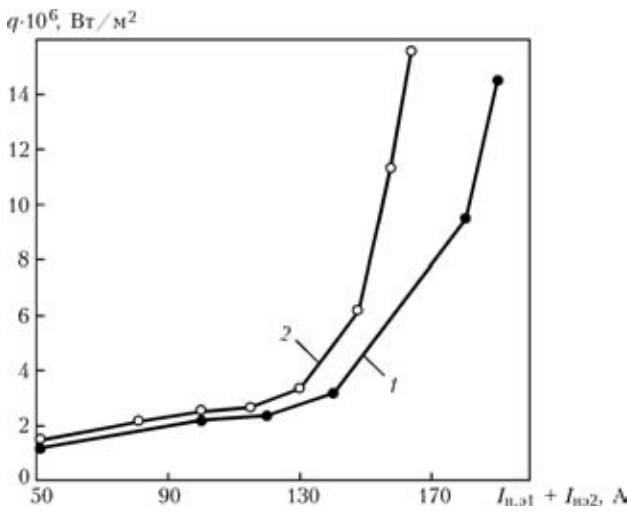


Рис. 4. Зависимость теплового потока в имитатор на участке «неплавящиеся электроды–сопла» от суммарного тока неплавящихся электродов при непрерывном (1) и импульсном (2) режиме ($d_c = 10$ мм; $Q_{Ar} = 6,2$ л/мин; $l_{н.э.с} = 5$ мм; $l_{к.с} = 4$ мм; $l_{в.в} = 4$ мм)

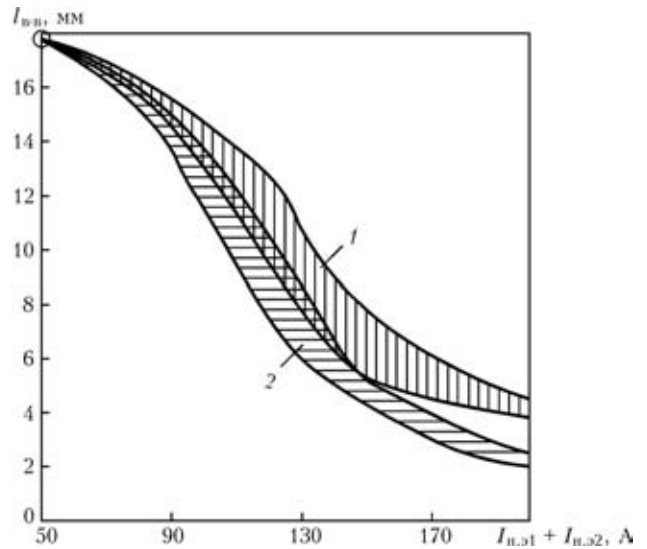


Рис. 5. Зависимость длины видимого вылета имитатора, при котором наблюдается шунтирование плазменной дуги, от суммарного тока неплавящихся электродов при непрерывном (1) и импульсном (2) режиме

плавящегося электрода порошковой плющенко, а также о роли импульсного режима горения плазменной дуги в процессах шунтирования.

Изучено влияние тока плазменной дуги и видимого (вне плазмотрона) вылета имитатора на процесс шунтирования плазменной дуги (рис. 5).

В качестве критерия шунтирования плазменной дуги принимали две величины: первая — начало интенсивного увеличения теплового потока в имитатор (на рис. 5 нижние кривые) и резкое увеличение теплового потока в имитатор (верхние кривые). Кривым соответствуют точки перегиба, показанные на рис. 4.

Из рис. 5 следует, что на режимах, соответствующих точкам, расположенным ниже заштрихованных зон, интенсивного шунтирования нет. Увеличение тока плазменной дуги вызывает прямо пропорциональное возрастание теплового потока в имитатор в зоне, расположенной между кривыми. Шунтирование дуги быстро увеличивается и тепловой поток в имитатор резко возрастает. Точки режимов, расположенные выше заштрихованных областей, соответствуют неустойчивым режимам наплавки, при которых процесс наплавки может нарушиться: возможно двойное дугообразование.

Как видно из рис. 5, с увеличением тока плазменной дуги допустимый видимый вылет плавящегося электрода уменьшается, что необходимо учитывать при разработке технологических процессов плазменной наплавки комбинированным способом с применением порошковой плющенко. В случае применения импульсного режима интенсивное шунтирование плазменной дуги начинается при меньших значениях видимого вылета, что подтверждает роль импульсов тока в имитатор как инициирующих процесс шунтирования.

Импульсный режим горения плазменной дуги следует признать менее устойчивым к двойному дугообразованию. Следовательно, параметры этого режима необходимо выдерживать более точно при производстве наплавочных работ. В практическом применении наплавки критическими параметрами являются ток плазменной дуги и значение видимого вне плазмотрона вылета порошковой плющенко.

Выводы

1. Нагрев плоского плавящегося электрода теплом плазменной дуги выше, чем нагрев электрода круглого сечения. При этом процессы шунтирования плазменной дуги развиваются интенсивнее при применении плоского плавящегося электрода. Импульсный режим горения плазменных дуг увеличивает нагрев плоского электрода и облегчает начало процесса шунтирования.

2. Импульсы тока дуг «неплавящиеся электроды — плоский плавящийся электрод» инициируют процесс начала шунтирования плазменных дуг. При этом с торца плоского электрода возникает маломощная дуга «плоский электрод — изделие», которая подплавляет торец плоского электрода. Установлено ее возникновение даже при нахождении торца плоского электрода внутри сопла плазмотрона.

3. Шунтирование плазменной дуги при импульсном режиме ее горения плоским электродом начинается в условиях, недостаточных для этого процесса (согласно принципу минимума Штеенбека).

1. Сидоров А. И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой. — М.: Машиностроение, 1987. — 187 с.

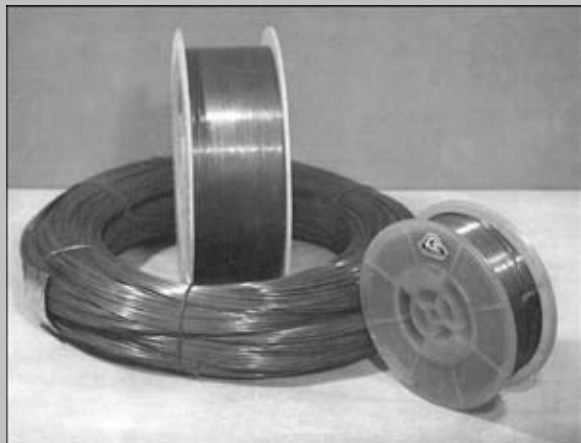


2. Корниенко А. Н., Макаренко Н. А., Кондрашов К. А. Исследование эффективности нагрева изделия при плазма-МИГ наплавке // Тр. V Междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы сварки, металлургии и родственных технологий». — Тбилиси: GWA, 2000. — С. 104–108.
3. Особенности плавления электродной проволоки при наплавке способом плазма-МИГ / В. В. Чигарев, Н. А. Макаренко, К. А. Кондрашов, Н. М. Воропай // Автомат. сварка. — 2001. — № 8. — С. 12–15.
4. Чигарев В. В., Макаренко Н. А., Кондрашов К. А. Особенности плавления порошковой проволоки при плазма-МИГ процессе // Сб. докл. II Междунар. конф. по сварочным материалам стран СНГ «Дуговая сварка. Материалы и качество на рубеже XXI века». — Орел, 2001. — С. 73.
5. Metcalf J. C., Quigley M. B. Heat transfer in plasma-arc welding // Welding J. — 1975. — № 3. — P. 99–103.
6. Акулов А. И., Боженко Б. Л., Ронский В. Л. Нагрев электродного металла при плазменной дуговой сварке плавящимся электродом в аргоне // Свароч. пр-во. — 1983. — № 2. — С. 8–10.
7. Макаренко Н. А. Разработка плазменного процесса с аксиальной подачей порошковой проволоки для наплавки пресс-форм: Дис. ... канд. техн. наук. — Мариуполь, 1999. — 215 с.
8. Чигарев В. В., Кондрашов К. А., Грановский Н. А. Повышение качества наплавленного металла при плазма-МИГ наплавке алюминиевых сплавов // Автомат. сварка. — 2006. — № 6. — С. 22–25.
9. Малаховский В. А. Плазменная сварка. — М.: Высш. шк., 1987. — 80 с.
10. Ленивкин В. А., Дюржеров Н. Г., Сагиров Х. Н. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. — М.: Машиностроение, 1989. — 263 с.
11. Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга. — М.: Машиностроение, 1970. — 334 с.
12. Ton H. Physical properties of the Plasma-Mig welding arc // Appl. Phys. — 1975. — № 8. — P. 922–938.

The paper presents the data on heating of a flat electrode (flattened flux-cored wire) inside the plasmatron by the plasma arc heat during plasma surfacing by the combined method. It is established that application of the pulsed mode of plasma arc running, in which the flat electrode periodically becomes the cathode relative to the plasmatron nonconsumable electrodes, improves its heating efficiency, while the proneness of the process to shunting of plasma arcs by the flat electrode is enhanced, occurring even in the cases, when the principle of Steinbeck minimum is not observed.

Поступила в редакцию 13.10.2006

СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ВЫСОКОМАРГАНЦОВИСТОЙ СТАЛИ ТИПА 110Г13Л



В ИЭС им. Е. О. Патона разработана самозащитная порошковая проволока ПП-АНВ2У, обеспечивающая получение качественных сварных соединений из стали 110Г13Л с содержанием никеля в металле шва 8...10 мас. %. Освоена технология полуавтоматической сварки разработанной самозащитной проволокой при изготовлении ковшей карьерных экскаваторов типа ЭКГ-5, ЭКГ-8 и др. Данная технология внедрена на ряде предприятий Украины и стран СНГ (КЦРЗ, Полтавский ГОК, АО «Лензолото» и др.).

Разработанная порошковая проволока ПП-АНВ2У/7, имеющая исключительно высокие пластические характеристики, рекомендуется для выполнения буферных слоев перед износостойкой наплавкой на сталь 110Г13Л с целью предупреждения отколов.

Разработанные порошковые проволоки предназначены для сварки и ремонта деталей из стали типа 110Г13Л, подвергающихся высоким ударным нагрузкам (валы, ковши карьерных экскаваторов, дорожки трековой цепи, решетки угольных комбайнов и другие изделия горнорудного и угледобывающего оборудования).

Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, отд. № 19
Тел./факс: (38044) 289 90 87, 287 10 88