

УДК 621.791.927.5

Размышляев А.Д.¹, Миронова М.В.², Дели А.А.³

СКОРОСТЬ ВРАЩЕНИЯ СТОЛБА ДУГИ И КАПЛИ НА ТОРЦЕ ЭЛЕКТРОДА ПРИ ДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ В ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Методом зондов установлено направление вращения дуги применительно к процессу дуговой сварки вольфрамовым электродом в аргоне и наплавки плавящимся электродом открытой дугой в постоянном продольном магнитном поле, а также направление вращения капли на торце электрода из ферромагнитного материала. Установлена взаимосвязь между скоростью вращения дуги и капли на торце электрода с величиной сварочного тока и индукцией магнитного поля.

В работах [1 – 3] показано, что при дуговой наплавке под флюсом с воздействием продольного магнитного поля (ПРМП) имеют место следующие положительные эффекты: значительно повышается коэффициент расплавления электродной проволоки α_p , уменьшаются глубина и площадь проплавления металла и доля участия основного металла в наплавленном.

При воздействии на дугу постоянного ПРМП она вращается относительно продольной оси, однако, представление о направлении этого вращения по представлениям исследователей противоречиво. По данным работ [1, 4, 5] при сварке неплавящимся электродом в ПРМП вращение дуги направлено в сторону движения положительных ионов. В работах [6, 7] для дуги, горящей на кольцевом аноде, убедительно показано, что вращение дуги в ПРМП может быть обусловлено только движением электронов и направлено в сторону движения электронов. Для варианта сварки, когда используется плоский анод, этот вопрос не исследован. Как установлено в работе [8] при сварке вольфрамовым электродом в аргоне с воздействием постоянного ПРМП по оси дуги образуется разрежение. Полагают, что этот эффект обусловлен вращением дуги. Однако, направление и скорость вращения дуги в ПРМП не исследованы. Нет таких данных для дуговой сварки плавящимся электродом. Точные сведения по этому вопросу необходимы для понимания процессов, происходящих в дуге при воздействии ПРМП, для объяснения факта снижения давления дуги на ее оси и связанного с этим снижения эффективности проплавления основного металла при наплавке.

Повышение α_p проволоки при сварке в ПРМП в работах [1, 2] объясняют улучшением условий теплопередачи через каплю за счет уменьшения толщины капли в направлении оси электрода при ее вращении под действием электромагнитных сил от взаимодействия радиальной составляющей тока в капле с осевой составляющей индукции ПРМП. Однако, в работе [3] было высказано предположение, подкрепленное детальным изучением строения магнитного поля в зоне капли на торце электрода из ферромагнитного материала, что капля вращается в противоположную сторону, относительно направления вращения, которое капля должна иметь по соображениям, высказанным в работах [1, 2]. Не известна также скорость вращения металла в капле при воздействии ПРМП. Такие данные позволят уточнить физические процессы, лежащие в основе наблюдаемых явлений, и управлять этими процессами.

В настоящей работе поставлена задача экспериментального определения направления и скорости вращения сварочной дуги и капли на торце электрода при воздействии постоянного ПРМП для повышения эффективности процесса дуговой наплавки под флюсом.

Для определения направления и скорости вращения столба дуги при сварке неплавящимся электродом в аргоне с воздействием постоянного ПРМП использовали метод зондов. Зондом (датчиком скоростного напора плазмы столба дуги) являлась вольфрамовая

¹ПГТУ, д-р техн. наук, проф.

²ПГТУ, инженер

³ПГТУ, инженер

проволочка диаметром 1,0 мм (рис. 1). Этот зонд (4) крепили к упругой струне (5) диаметром 0,25 мм, либо 0,4 мм. Струна с натягом крепилась к опорам (6). Усилие, действующее на зонд, определяли по закручиванию струны. К струне крепили легкое зеркальце (8). При воздействии напора плазмы дуги на зонд (4) струна закручивалась и луч, направленный от лазерной указки (7), отражаясь от зеркальца (8), попадал на экран (9). Расстояние между зеркальцем (8) и экраном (9) для усиления чувствительности системы составляло примерно 2,5 м.

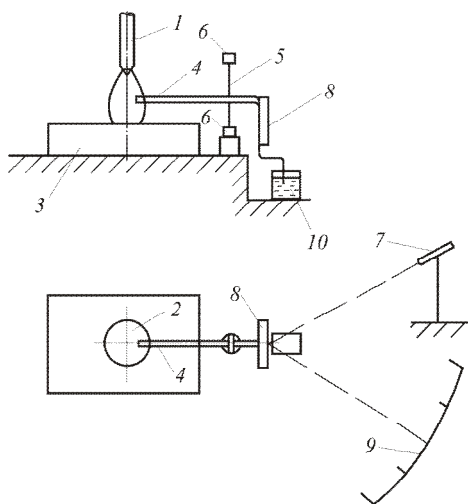


Рис. 1 – Схема устройства для измерения усилия на зонд: 1 – электрод; 2 – дуга; 3 – изделие; 4 – зонд; 5 – струна; 6 – опоры; 7 – лазерная указка; 8 – зеркальце; 9 – экран; 10 – демпфирующее устройство

При этом также была определена величина коэффициента лобового сопротивления зонда C_x , которая не изменялась в диапазоне скоростей потока аргона 7...20 м/с и составляла $C_x = 0,35$.

Выполняли эксперименты по сварке в аргене вольфрамовым электродом марки ВЛ диаметром 4,0 мм на прямой полярности. Угол заточки вольфрамового электрода составлял 90° (без притупления). Основным металлом служила медная пластина (не охлаждаемая водой) толщиной 6 мм.

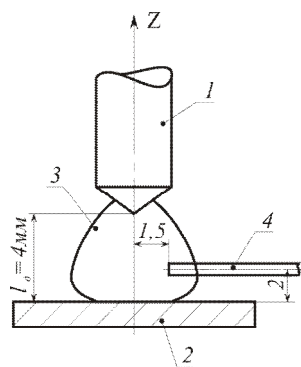


Рис. 2 – Схема установки зонда при измерении усилия на зонд: 1 – электрод; 2 – изделие – пластина; 3 – дуга; 4 – зонд

Тарировку системы (определение соотношения между усилием на зонд и отклонением луча на экране) осуществляли по методике, приведенной в работе [9]. При этом воздействовали на зонд потоком аргона из прямоугольной щели. Как при тарировке, так и в дальнейшем при обработке экспериментальных данных использовали известное соотношение:

$$F = C_x \cdot S_3 \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2},$$

где F – сила, действующая на зонд, Н;

S_3 – площадь лобового сопротивления зонда, м²;

ρ – плотность аргона, кг/м³;

V – скорость потока аргона, м/с.

Расстояние от торца электрода до изделия – пластины составляло 4 мм. Перед сваркой устанавливали торец зонда на расстоянии 1,5 мм от оси вольфрамового электрода (и дуги) по схеме рис. 2. Установлено, что при увеличении индукции (B_z) постоянного ПРМП тангенциальная (азимутальная) скорость потока плазмы в дуге (V_ϕ) возрастает, а угловая скорость вращения дуги составляет порядка 900 – 1000 об/с (рис. 3, кривые 2 и 3). Эти данные получены при учете, что, как и при тарировке, в плазме дуги газ находится при температуре $T_0 = 300$ К. Если учесть, что плотность газов обратно пропорциональна температуре, и приняв температуру сварочной дуги (в среднем) $T_0 = 12000$ К, то приведенные на рис. 3 данные следует увеличить в $\sqrt{T_0/T_0} = \sqrt{12000/300} \approx 6$ раз. Тогда скорость потока плазмы при ее вращении составит порядка 100 м/с, что сопоставимо с известными данными о скорости потоков плазмы в осевом направлении (без воздействия ПРМП) [9].

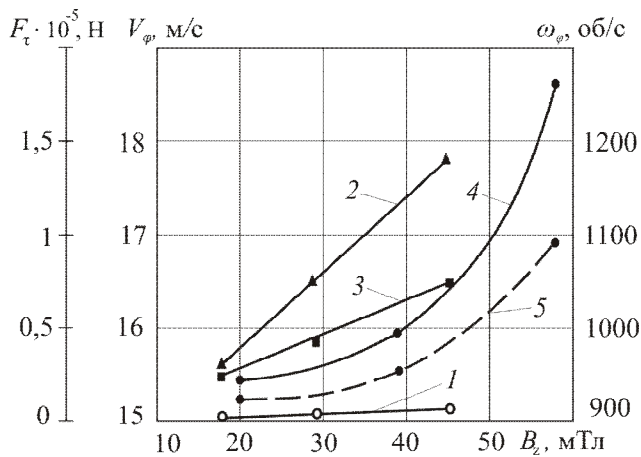


Рис. 3 – Влияние индукции постоянного ПРМП на усилие напора плазмы дуги на зонд (1, 4, 5), скорость вращения V_ϕ (2) и угловую скорость вращения ω_ϕ (3) дуги: $I_{ce} = 200$ А, $I_0 = 4$ мм, $V_{ce} = 72$ м/ч; 4,5 – СПЭ СВ-08А диаметром 3,0 мм: $I_{ce} = 400...420$ А, $U_0 = 38$ В, $V_{ce} = 75$ м/ч;

осевой составляющей индукции (B_z) ПРМП с радиальной составляющей тока в дуге (направление определено по правилу левой руки). Установлено, что вращение столба дуги обусловлено движением в ней электронов.

С помощью устройства по рис. 1 удалось определить направление вращения дуги при наплавке проволокой СВ-08А диаметром 3 мм открытой дугой на пластину из стали 09Г2С с воздействием постоянного ПРМП, поскольку при воздействии ПРМП имел место перенос металла весьма мелкими каплями. При режиме наплавки (обратная полярность): $I_{ce} = 400...420$ А, $U_0 = 38$ В, $V_{ce} = 75$ м/ч внешняя составляющая дуги была 4...5 мм, а глубина кратера – 2,5 мм. Вольфрамовый зонд диаметром 1,0 мм располагали по схеме рис. 2.

Установлено, что с увеличением индукции B_z ПРМП усилие, оказываемое вращающейся дугой на зонд, увеличивалось нелинейно (рис. 3, кривая 4). Это усилие значительно больше, чем при сварке вольфрамовым электродом в аргоне (рис. 3, кривая 1). В этом случае не вычисляли скорость вращения дуги, поскольку в создании усилия на зонд участвовали, безусловно, мелкие капли и пары электродного металла. Было установлено, что это усилие на зонд приблизительно в 2 раза больше усилия осевого (вдоль оси Z) напора плазмы (рис. 3, кривая 5). Таким образом, тангенциальная скорость плазмы в этом случае сопоставима с осевой скоростью потока, который обуславливает газодинамическое давление дуги (на основной металл). Направление вращения дуги при воздействии ПРМП в этом случае находит объяснения, если оно обусловлено взаимодействием вектора радиальной компоненты индукции B_r , величина которой по данным работы [7] сопоставима с величиной осевой компоненты B_z , с осевой составляющей тока в дуге j_z . Вращение плазмы столба дуги в этом случае также обусловлено движением электронов под действием ПРМП.

Направление вращения и скорость вращения капли под действием постоянного ПРМП определяли путем моделирования. Каплю моделировали припоем марки ПОС – 40, имевшем температуру плавления 220 °С. Измерения осуществляли на модели по схеме рис. 4. К массивной пластине из стали 09Г2С толщиной 20 мм (1) была прикреплена пластина из асбоцемента толщиной 4 мм (2), в которой помещался круглый штырь (3) из латуни диаметром 5 мм. Пруток из припоя (4) диаметром 4 мм проходил через мундштук сварочного автомата АДС-1002 (не показан). К мундштуку автомата крепили соленоид с ферросердечником (6), который генерировал ПРМП. Расстояние от нижнего среза соленоида до пластины (1) составляло $H = 40$ мм. Поскольку на участке вылета H пруток припоя – немагнитный материал, то этот пруток помещали в трубку из ферромагнитного материала (5, рис. 4, а). Такая трубка, как показано в работе [7], создает в зоне модельной капли значительную радиальную

Для уточнения этого вопроса выполняли эксперименты по определению скорости осевого потока (напора) плазмы столба дуги (газодинамической составляющей давления дуги) без воздействия ПРМП с помощью указанного устройства (рис. 1). Вольфрамовый электрод при этом устанавливали по схеме рис. 2. При $I_{ce} = 200$ А оказалось, что среднее значение осевой скорости потока плазмы дуги составило 28 м/с (при $T_0 = 300$ К). Эти данные подтверждают вывод о том, что тангенциальная (азимутальная) скорость вращения плазмы дуги в ПРМП сопоставима с осевой составляющей скорости потока плазмы столба дуги. Направление вращения столба дуги при воздействии ПРМП всегда соответствовало направлению вектора силы от векторного произведения

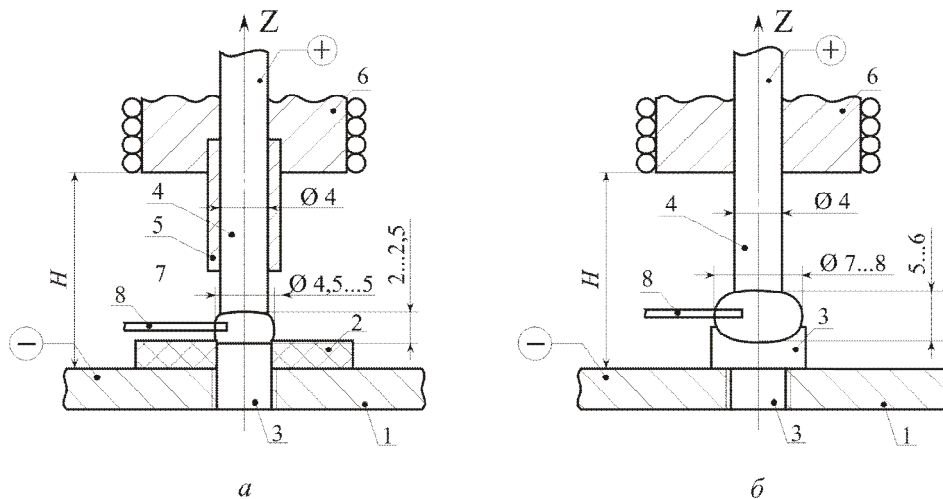


Рис. 4 – Схемы для измерений скорости вращения модельной капли:
 1 – изделия – пластина; 2 – асбоцемент; 3 – штырь (латунь);
 4 – пруток припоя; 5 – трубка; 6 – соленоид; 7 – капля; 8 – зонд

компоненту индукции (до 50 % относительно продольной составляющей). Всю конструкцию устанавливали на электропечь (не показано) и осуществляли нагрев до температуры плавления припоя. Каплю «выращивали», подавая вниз пруток (4) до оплавления торца прутка и образования капли (7) высотой 2...2,5 мм. Затем в каплю вставляли зонд (8) из медной (залуженной) проволоки диаметром 0,5 мм на контролируемую глубину (порядка 1,5 мм), после чего включали постоянный ток через систему: пруток (4) – капля (7) – штырь (3), а также постоянный ток в обмотке соленоида для создания ПРМП в зоне капли. Уровень индукции ПРМП B_z и B_r контролировали тесламетром типа ЭМ-435 с датчиком Холла, имевшем измерительную базу 1 × 1 мм.

Установлено, если электрод изготовлен из ферромагнитного материала (в модели – пруток припоя с ферромагнитной трубкой), то направление вращения капли соответствует данным работы [3], т.е. капля вращается под действием силы, образованной взаимодействием радиальной компоненты индукции B_r с осевой компонентой тока в капле j_z . Капля (немагнитная) на торце электрода из ферромагнитного материала вращается в ту же сторону, что и сварочная дуга. Капля вращается в этом направлении, если ее размер в осевом направлении меньше, чем диаметр электрода. При увеличении индукции B_z ПРМП и не изменяющемся токе через каплю, скорость вращения металла в ней возрастает (рис. 5, а). При увеличении тока через каплю, но неизменной величине индукции B_z , скорость вращения металла также возрастает (рис. 5, б).

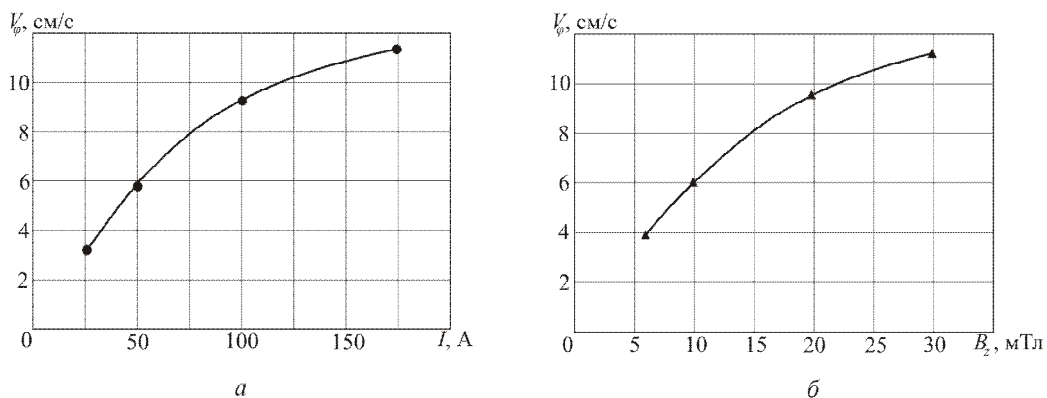


Рис. 5 – Зависимость скорости вращения металла капли от тока при (а) и индукции постоянного ПРМП (б): а – $B_z = 18$ мТл; б – $I_{ca} = 100$ А; 1 – $V_\varphi = f(B_z)$; 2 – $\omega_\varphi = f(B_z)$.

Моделированием, выполненным на прутке припоя без трубки из ферромагнитного материала, установлено, что если площадь токоподвода к нижней части капли больше, чем сечение немагнитного электрода (рис. 4, б), то капля вращается в другую сторону. Это вращение капли обусловлено взаимодействием радиальной составляющей тока в капле с осевой составляющей индукции B_z ПРМП, как это и предполагали в работе [6]. Однако, поскольку на торце электрода образуются весьма мелкие капли, то реализуется механизм, указанный в работе [3], и подтвержденный в данной работе.

Целесообразно дальнейшее выполнение исследований по установлению скорости вращения капли с учетом других форм и размеров капель на торце электрода. Такие исследования позволят детальнее изучить механизм влияния ПРМП на вращение капли и в конечном итоге, повысить производительность расплавления электрода.

Выводы

1. Установлено, что при сварке вольфрамовым электродом в аргоне и наплавке открытой дугой плавящимся электродом в постоянном ПРМП направление вращения дуги относительно ее оси обусловлено движением электронов, при этом тангенциальная составляющая скорости вращения дуги пропорциональна величине индукции ПРМП и сопоставима с осевой составляющей скорости потока плазмы в дуге.
2. Показано, что при дуговой наплавке в постоянном ПРМП направление вращения капли обусловлено электромагнитной силой от взаимодействия осевой составляющей тока в капле с радиальной составляющей индукции ПРМП на торце ферромагнитного электрода, скорость вращения капли возрастает при увеличении тока через каплю и индукции ПРМП.

Перечень ссылок

1. *Биржнев В.А.* Теоретические и технологические основы повышения производительности дуговой сварки и наплавки во внешнем аксиальном магнитном поле: Автореферат дисс. докт. техн. наук. – Липецк, 1997. – 37 с.
2. *Болдырев А.М.* Особенности плавления электродного металла при сварке во внешнем продольном магнитном поле / *А.М. Болдырев, В.А. Биржнев, А.В. Черных* // Сварочное производство. – 1991. – № 5. – С. 28 – 30.
3. *Размышляев А.Д.* Влияние продольного магнитного поля на производительность расплавления проволоки при электродуговой наплавке под флюсом / *А.Д. Размышляев, А.А. Дели, М.В. Миронова* // Автоматическая сварка. – 2007. – № 6. – С. 31 – 35.
4. *Тиходеев Г.М.* Энергетические свойства электрической сварочной дуги / *Г.М. Тиходеев* – М. – Л.: Издат. акад. наук СССР, 1961. – 254 с.
5. *Лесков Г.И.* Электрическая сварочная дуга / *Г.И. Лесков*. – М.: Машиностроение, 1970. – 334 с.
6. *Гвоздецкий В.С.* Перемещение электрической дуги в магнитном поле / *В.С. Гвоздецкий, В.С. Мечев* // Автоматическая сварка. – 1963. – № 10. – С. 54 – 62.
7. *Гвоздецкий В.С., Мечев В.С.* Исследование вращающейся в магнитном поле сварочной дуги постоянного тока (плоская и конусная дуга) / *В.С. Гвоздецкий, В.С. Мечев* // Автоматическая сварка. – 1963. – № 12. – С. 1 – 6.
8. О формировании сварного шва в продольном магнитном поле при аргонодуговой сварке / *В.Н. Селянников, В.А. Блинков, Ю.В. Казаков и др.* // Сварочное производство. – 1975. – № 11. – С. 5 – 7.
9. *Ленивкин В.А.* Определение скоростного напора плазмы сварочной дуги / *В.А. Ленивкин, П.И. Петров, Н.Г. Дюргеров* // Сварочное производство. – 1984. – № 7. – С. 3 – 4.

Рецензент: А.Н. Серенко
канд. техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 20.02.2008