



ВЛИЯНИЕ ФЛЮСОВ НА ТЕМПЕРАТУРУ И ПЛОТНОСТЬ ТОКА В СТОЛБЕ ДУГИ ПРИ АРГОДУГОВОЙ СВАРКЕ ТИТАНА ВОЛЬФРАМОВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

Л. Е. ЕРОШЕНКО, В. П. ПРИЛУЦКИЙ, кандидаты техн. наук, В. Ю. БЕЛОУС, инж., В. Н. ЗАМКОВ, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследовано влияние фторидов бария, кальция, магния, натрия и алюминия, являющихся основными компонентами сварочных флюсов для аргодуговой сварки титана, на температуру столба дуги и ее распределение в прианодной области. Установлено, что при дуговой сварке вольфрамовым электродом в аргоне по слою флюса (TIG-F) повышается температура и электропроводность плазмы столба дуги, а форма температурного поля в прианодной области дуги приближается к цилиндрической. Глубокое проплавление, характерное для этого способа сварки, обусловлено более высокими температурой и плотностью тока в дуге вблизи анода.

Ключевые слова: аргодуговая сварка, титан, флюс, спектральная линия, температура столба дуги, электропроводность

Главной отличительной особенностью аргодуговой сварки вольфрамовым электродом по слою флюса (TIG-F) является высокая плотность тока в анодном пятне [1–3]. Это и определяет технологические преимущества указанного способа сварки — глубокое проплавление, узкие швы, относительно низкую погонную энергию [4–6]. Происходящие в зоне дуги физико-химические процессы, обуславливающие ее контрагирование и, как следствие, повышение плотности тока на аноде, детально рассмотрены в ряде работ [7, 8]. Установлено, что степень сжатия дуги и рост плотности тока в анодном пятне зависят от химического состава флюса и активности его взаимодействия со свариваемым металлом [7, 9]. Однако в литературе отсутствуют экспериментальные данные о влиянии флюсов на температурные параметры столба дуги. Лишь в [10] на основании полученной зависимости между степенью почернения спектральных линий паров свариваемого металла, глубиной его проплавления и составом флюса высказано предположение, что флюсы влияют на температуру дуги вблизи анода. В то же время именно температура и плотность тока прианодной области являются теми основными па-

раметрами дуги, которые определяют характер и механизм проплавления металла.

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния фторидов бария, кальция, магния, натрия и алюминия, являющихся основными компонентами сварочных флюсов для титана, на температуру столба дуги и ее распределение в прианодной области. В качестве анода использовали пластины из технического титана марки ВТ1-0 толщиной 4 мм. Сварку образцов выполняли вольфрамовым электродом марки СВИ-1 диаметром 3 мм с углом заточки 30°. При этом сварочный ток составлял 100 А, скорость сварки — 8 м/ч, установочная длина дуги — 5 мм. Методика определения температуры в дуге и схема экспериментальной установки приведены в [11]. Фотосъемку поперечных спектров дуги начинали на расстоянии 0,1 мм от поверхности анода и продолжали вдоль столба дуги с интервалом 0,25 мм в направлении катода (рис. 1).

Как и в работе [11], радиальные распределения температуры в различных сечениях столба дуги определяли по абсолютной интенсивности свечения континуума аргоновой плазмы и атомных спектральных линий ArI. Переход от радиальных распределений температуры T к радиальным распределениям электропроводности σ осуществляли по теоретической кривой $\sigma(T)$, приведенной в [12]. За

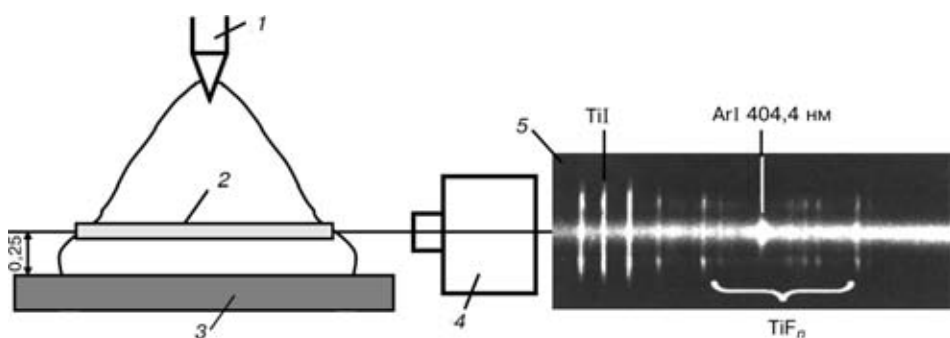


Рис. 1. Схема фотосъемки поперечных спектров столба дуги: 1 — электрод; 2 — исследуемое сечение столба дуги; 3 — титановый анод; 4 — спектрограф СТЭ-1; 5 — спектрограмма исследуемого участка столба дуги



$T_0 \cdot 10^{-3}, \text{K}$

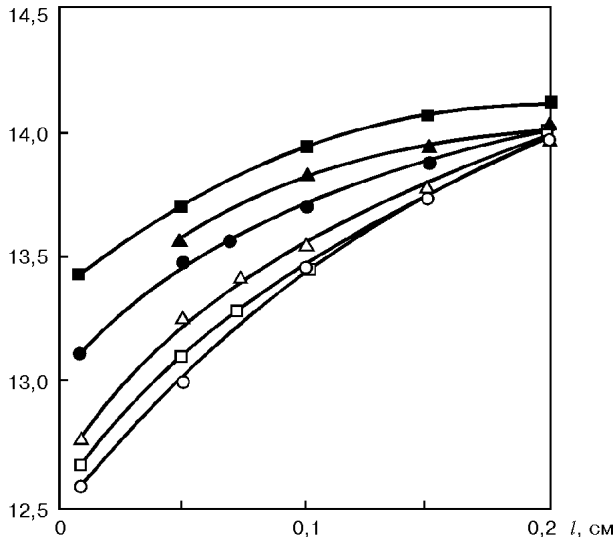


Рис. 2. Распределение температуры по оси столба дуги (○ – Ti; □ – BaF₂; Δ – CaF₂; ● – MgF₂; ▲ – NaF; ■ – AlF₃) радиус столба дуги принимали значение r , при котором $\sigma \approx 0$. Если поперечные размеры столба аргоновой дуги определять только по свечению непрерывного спектра тормозного и рекомбинационного излучения электронов, то значение диаметра токопроводящего канала может быть занижено. Это

вызвано тем, что при фотографировании спектров дуги излучение континуума регистрируется лишь при температурах свыше 8500... 10500 К [13], а электропроводность чистой аргоновой плазмы снижается до нулевых значений лишь при $T \approx 6000$ К [12]. Поэтому график радиального распределения температуры $T(r)$ по сечению столба дуги строили в два этапа. Вначале определяли радиальное распределение температуры по интенсивности свечения континуума в высокотемпературной области дуги. Затем по интенсивности свечения спектральных линий аргона ArI находили распределение температуры в низкотемпературной области дуги, начиная от участка, где заканчивалось свечение континуума. После этого обе кривые соединяли, совмещая точки по радиусу столба дуги, в которых значения температур, полученные по свечению континуума и линий ArI, совпадали. Однако необходимо подчеркнуть, что для определения аксиального распределения температуры в столбе дуги достаточно знать лишь радиальные распределения интенсивности свечения континуума [11]. Полученные таким образом аксиальные распределения температур (рис. 2) свидетельствуют о том, что при сварке по слою флюса температура в прилегающей к аноду области выше, чем при сварке без флюса. Степень увеличения температуры, как и глубины проплавления [9],

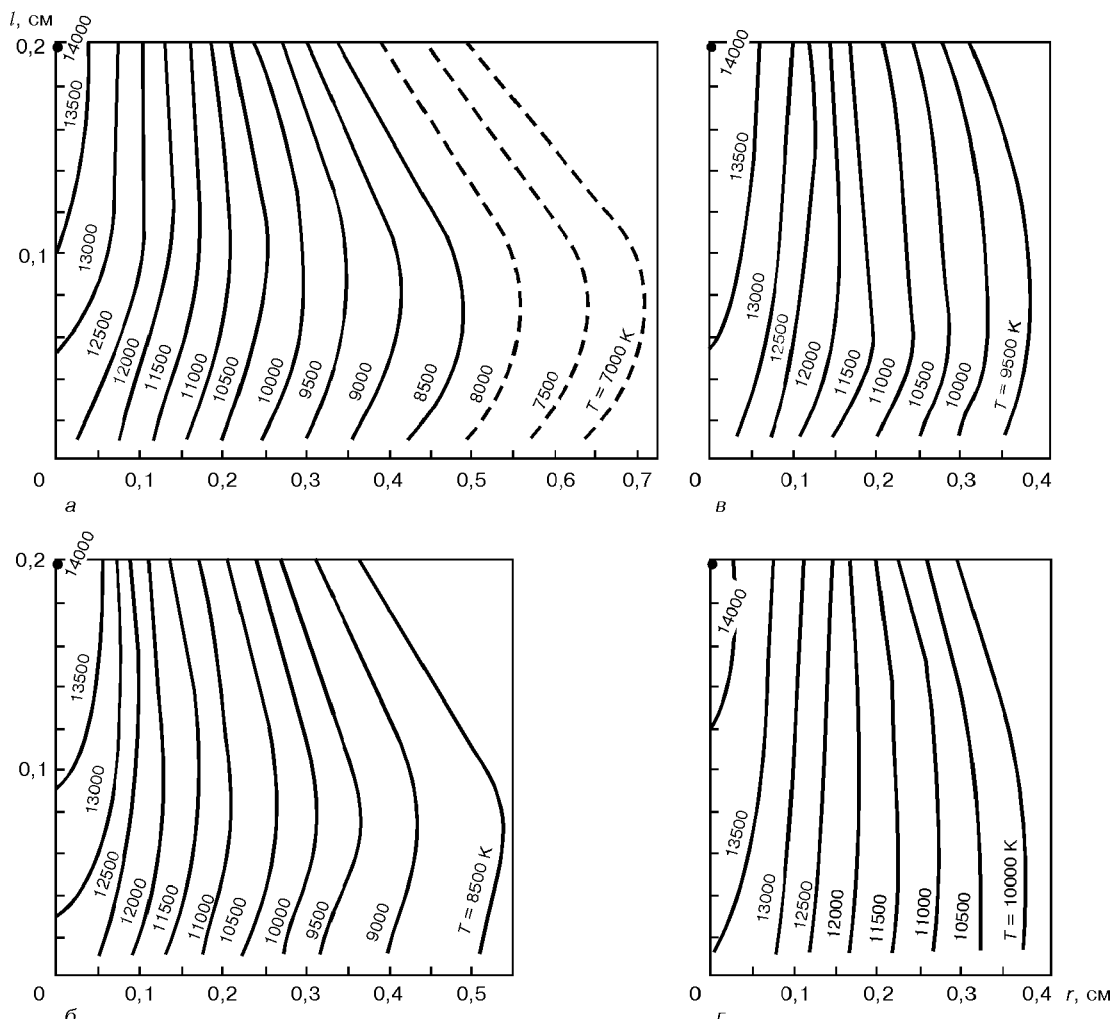


Рис. 3. Температурные поля в столбе дуги при сварке с анодом: а – Ti; б – Ti + CaF₂; в – Ti + MgF₂; г – Ti + AlF₃

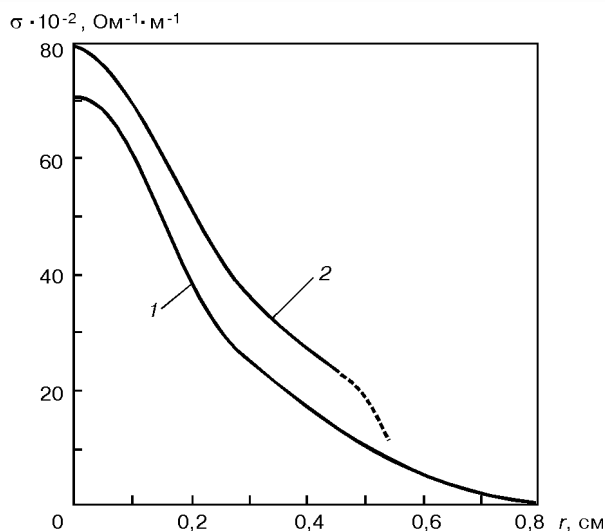


Рис. 4. Радиальное распределение электропроводности в столбе дуги на расстоянии 0,5 мм от анода: 1 — Ti; 2 — Ti + AlF₃

возрастает в ряду BaF₂ → CaF₂ → MgF₂ → NaF → AlF₃ и в направлении анода. В такой же последовательности увеличивается и протяженность зоны с более высокой температурой вдоль столба дуги. Результаты этих исследований экспериментально подтверждают, что применение флюсов при сварке вольфрамовым электродом в аргоне повышает температуру плазмы в прианодной области дуги.

Следует отметить, что в спектрах, снятых непосредственно у анода, при использовании в качестве флюса фторида натрия наблюдалось настолько большое количество спектральных линий паров материала анода, что это не дало возможности корректно определить температуру дуги ближе, чем на расстоянии 0,5 мм от поверхности анода. В то же время при сварке без флюса в спектре дуги не наблюдались спектральные линии TiI (в отличие от спектров, полученных при сварке по флюсу). Это свидетельствует об их незначительной концентрации на периферии столба дуги. Анализ теоретической зависимости коэффициента интенсивности излучения атомной линии аргона ArI от температуры $I(T)$ при наличии примесей паров анода в составе аргоновой плазмы [14, 15] показал, что при массовой концентрации паров анода, например, железа, вплоть до 10 % температуру на периферии столба дуги можно измерять, используя состав беспримесной аргоновой плазмы. Поскольку потенциалы ионизации железа и титана имеют близкие значения (соответственно 7,87 и 6,82 эВ), то эта возможность, по-видимому, сохраняется и для состава плазмы Ag + Ti. Наличие же флюсов в зоне сварки значительно усложняет определение радиальных распределений температуры $T(r)$ и электропроводности $\sigma(r)$ на периферии столба дуги. Так, при сварке по флюсу в участках дуги, где температура составляет ~ 8500 ... 9000 К, наблюдалось интенсивное свечение линий TiI и молекулярных полос TiF_n (см. рис. 1). Максимумы их свечения пространственно совпадают и находятся на расстоянии ≈ 4 мм от оси дуги. Поэтому, начиная с температуры порядка 8500... 9000 К, плазма в данном случае перестает быть чисто аргоновой, что не позволяет пользоваться

составом беспримесной аргоновой плазмы для корректного определения температуры и соответственно электропроводности в периферийных участках дуги. Учитывая склонность фторидов титана к образованию отрицательных молекулярных ионов [14, 15], можно предположить, что электронная электропроводность в этих участках плазмы резко уменьшается. Поэтому на рис. 3 представлены температурные поля лишь центральной части дуг при сварке по слою CaF₂, MgF₂ и AlF₃. Как видно из рис. 3, а, форма температурного поля столба дуги при сварке без флюса аналогична пространственной форме свечения свободно горящей дуги в аргоне [16]. Она имеет форму конуса, расширяющегося в направлении от катода к аноду. У поверхности последнего наблюдается пространственное сужение столба дуги, обусловленное особенностями теплопередачи от плазмы металлическому аноду. При сварке по флюсу в прианодной области это пространственное сужение и конусность температурного поля уменьшаются (рис. 3, б-г). При этом форма температурного поля приближается к цилиндрической. Степень влияния флюсов как на нее, так и на повышение температуры в столбе дуги (см. рис. 2) и увеличение глубины проплавления зависит от химического состава флюса и усиливается от CaF₂ к AlF₃. Одновременно в столбе дуги увеличивается и радиус зоны с более высокой температурой. Так, например, на расстоянии 3,5 мм от оси дуги в сечении на расстоянии 0,2 мм от поверхности анода температура плазмы при сварке по флюсу AlF₃ повысилась более чем на 1000 К по сравнению с температурой на таком же участке при сварке без флюса.

Рост температуры в центральных областях столба дуги при сварке по флюсу вызывает соответствующее увеличение электропроводности этих участков плазмы (рис. 4). При этом необходимо отметить, что если при сварке без флюса электропроводящая зона заканчивается на расстоянии ≈ 8 мм от оси дуги, то при сварке по слою таких флюсов, как MgF₂, NaF и AlF₃, характер кривой, описывающий распределение электропроводности $\sigma(r)$, должен претерпевать резкое изменение уже на расстоянии ≈ 4 мм от оси дуги (при ее длине 5 мм). Именно здесь, как отмечалось выше, наблюдаются максимумы интенсивности свечения молекулярных полос фторидов титана, а, значит, и резкое падение электропроводности плазмы вследствие захвата электронов фторидами титана и образованием отрицательных молекулярных ионов типа TiF_n⁻ [7, 9]. В то же время по условиям экспериментов общая электропроводность столба дуги во всех случаях должна оставаться неизменной. Это связано с тем, что во всех опытах сварочный ток оставался неизменным (100 А), как и напряженность поля в столбе дуги, поскольку она не зависит от наличия флюса в зоне сварки [17].

Таким образом, тот факт, что при сварке по флюсу электропроводность плазмы центральной части столба дуги повышается (рис. 4), а его общая электропроводность остается неизменной, позволяет утверждать, что электропроводящий канал столба дуги при сварке по флюсу сжимается. Его радиус ста-



новится меньше, чем при сварке без флюса. Однако, как отмечалось выше, корректно определить радиальные распределения температуры $T(r)$ и электропроводности $\sigma(r)$ в периферийной области столба дуги при сварке по флюсу экспериментальными методами не представляется возможным. Следовательно, нельзя экспериментально определить и радиус электропроводящей зоны столба дуги. Характер распределения электропроводности в периферийной зоне столба дуги условно представлен на рис. 4 штриховой линией.

На основании приближенных расчетов, выполненных по данным рис. 4, можно утверждать лишь то, что при сварке по флюсу AlF_3 электропроводность центральной зоны столба дуги, ограниченной радиусом 0,4 см, на расстоянии 0,5 мм от анода составляет около 75 общей электропроводности дуги и не более 47 % при сварке без флюса.

Выводы

1. Экспериментально установлено, что при аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом по слою флюса (TIG-F) повышаются температура и электропроводность плазмы столба дуги, а форма температурного поля в прианодной области дуги приближается к цилиндрической.

2. Глубокое проплавление, характерное для этого способа сварки, обусловлено более высокой температурой и плотностью тока в дуге вблизи анода.

1. *Замков В. Н., Прилуцкий В. П.* Распределение плотности тока в анодном пятне при дуговой сварке титана // Автомат. сварка. — 1987. — № 3. — С. 19–22.
2. *Влияние* активирующих флюсов на проплавляющую способность дуги и концентрацию энергии в анодном пятне / О. Е. Островский, В. Н. Крюковский, Б. Б. Бук и др. // Свароч. пр-во. — 1977. — № 3. — С. 13–15.
3. *Плотность* тока в анодном пятне при сварке обычных и рафинированных сталей / М. М. Савицкий, В. С. Гвоз-

The influence of barium, calcium, magnesium, sodium and aluminium fluorides that are the main components of welding fluxes for argon-arc welding of titanium, on the arc column temperature and its distribution in the near anode region has been studied. It is found that in tungsten electrode argon-arc welding over a layer of flux (TIG-F) the temperature and electrical conductivity of the arc column plasma are increased, and the shape of the temperature field in the near-anode region of the arc is close to the cylindrical one. Deep penetration, typical for this welding process, is due to higher temperature and current density in the arc near the anode.

децкий, В. И. Скрышник и др. // Автомат. сварка. — 1979. — № 7. — С. 17–20.

4. *Металлургия* и технология сварки титана и его сплавов / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, В. Е. Блащук и др. — Киев: Наук. думка, 1986. — 240 с.
5. *Савицкий М. М., Кушниренко Б. Н., Олейник О. И.* Особенности сварки сталей вольфрамовым электродом с активирующими флюсами (ATIG-процесс) // Автомат. сварка. — 1999. — № 12. — С. 20–28.
6. *Paton V. E., Zamkov V. N., Priloutsky V. P.* Le soudage A-TIG du titane et de ses alliages // Soudage et techn. connexes. — 1998. — № 11–12. — P. 23–26.
7. *Contraction* of the welding arc caused by the flux in tungsten-electrode argon-arc welding / В. Е. Paton, V. N. Zamkov, V. P. Prilutsky, P. V. Poritsky // The Paton Welding J. — 2000. — № 1. — P. 5–11.
8. *Савицкий М. М., Лесков Г.И.* Механизм влияния электроотрицательных элементов на проплавляющую способность дуги с вольфрамовым катодом // Автомат. сварка. — 1980. — № 9. — С. 17–22.
9. *Замков В. Н., Прилуцкий В. П., Гуревич С. М.* Влияние состава флюса на процесс сварки титана неплавящимся электродом // Там же. — 1977. — № 4. — С. 22–26.
10. *Исследование* свечения паров анода для оценки технологических характеристик дуги в аргоне / Л. Е. Ерошенко, В. Н. Замков, В. С. Мечев, В. П. Прилуцкий // Там же. — 1979. — № 9. — С. 33–35.
11. *Аксиальное* распределение температуры в дуге при сварке титана вольфрамовым электродом в аргоне / Л. Е. Ерошенко, В. П. Прилуцкий, В. С. Белоус, В. Н. Замков // Там же. — 2001. — № 3. — С. 11–14.
12. *Мечев В. С., Ерошенко Л. Е.* Электропроводность электрической дуги в аргоне // Там же. — 1974. — № 7. — С. 13–16.
13. *Мечев В. С., Ерошенко Л. Е.* Радиальное распределение температуры электрической дуги в аргоне // Там же. — 1975. — № 3. — С. 6–9.
14. *Мессу Г.* Отрицательные ионы: Пер. с англ. — М.: Мир, 1979. — 754 с.
15. *Мак-Даниель И.* Процессы столкновений в ионизованных газах: Пер. с англ. — М.: Мир, 1967. — 832 с.
16. *Olsen H. N.* The electric arc as a light source for quantitative spectroscopy // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. — 1963. — 3. — P. 305–333.
17. *Гуревич С. М., Замков В. Н.* Некоторые особенности сварки титана неплавящимся электродом с применением флюсов // Автомат. сварка. — 1966. — № 12. — С. 13–16.

Поступила в редакцию 06.07.2000