



АКСИАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ДУГЕ ПРИ СВАРКЕ ТИТАНА ВОЛЬФРАМОВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ В АРГОНЕ*

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)

Спектральным методом исследована реальная сварочная аргоновая дуга с неплавящимся вольфрамовым электродом, горящая на плавящемся титановом и неплавящемся медном водоохлаждаемом анодах. Получены экспериментальные данные о распределении температуры в столбе дуги по ее радиусу вблизи анода. Показано, что аксиальное распределение температуры в столбе дуги зависит от состояния анода. В области, прилегающей к аноду, температура дуги выше у плавящегося анода. Строение дуг в обоих случаях одинаково, т. е. не зависит от состояния анода.

Ключевые слова: сварочная дуга, спектр, температура дуги, титановый анод, неплавящийся анод, вольфрамовый электрод

Температура сварочной дуги является одним из основных параметров, определяющим ее технологические характеристики, а также физико-химические процессы, происходящие в зоне сварки. Поэтому данные о значениях температуры и ее распределении в реальной сварочной дуге необходимы как для оценки эффективности используемых методов повышения технологических возможностей дуги, так и для уточнения направленности и кинетики металлургических процессов.

Однако в литературе отсутствуют данные, полученные непосредственно в процессе сварки. В большинстве работ исследования выполнены с использованием неплавящегося (обычно медного водоохлаждаемого) анода [1–6]. Условия же экспериментов, при которых анод плавился [1, 7–14], значительно отличались от реальных условий сварки. При этом в качестве анода, как правило, использовали сплавы на основе железа. Литературные источники, в которых были бы приведены данные о температуре в дуге, горящей на плавящемся титановом аноде, нам не известны. В свою очередь, при исследованиях температуры в дугах, горящих на плавящихся стальных анодах, в ряде случаев были допущены некоторые методические неточности. К ним, например, можно отнести не всегда корректную обработку результатов спектральных исследований [1, 9–11, 13, 14] при выбранной ширине щели спектрографа [15], использование недостоверных значений вероятностей перехода спектральных линий [14] и др. Кроме того, в публикациях не указано, с какой погрешностью устанавливали расстояние от плоскости анода до плоскости поперечного сечения столба дуги, в которой производили съемку спектра. Следует также отметить и тот факт, что все исследования были выполнены на неподвижной относительно анода дуге (в отличие от реальных условий сварки).

*Работа выполнена при поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований, проект № 4.04/578.

Вероятно, указанные выше методические погрешности повлияли на результаты определения температуры на оси дуги [9–13]. Например, как следует из указанных работ, при возрастании сварочного тока в 20 раз (от 20 до 400 А) температура в дуге повышается всего лишь на 600 К. Трудно согласиться и с результатами, полученными в работе [14]. В ней исследовали аргоновую дугу, используя вольфрамовый катод и аноды, изготовленные из хромоникелевой стали и алюминия. Среднюю по всему объему столба дуги температуру определяли по относительной интенсивности свечения спектральных линий ArI, ArII и CrI. Несмотря на то что интенсивное свечение атомных линий аргона может наблюдаться лишь при температуре более 6000 К [16], значения температуры, рассчитанные авторами работы [14] по спектральным линиям ArI, не превысили 4000 К при $I_{св} = 50$ А. Не ясна также причина уменьшения температуры дуги, которую определяли по спектральным линиям ArII — 13300...10900 (стальной анод) и 15400...14300 К (алюминиевый анод) при возрастании тока от 25 до 85 А. По-видимому, методическими погрешностями при съемке спектров и их обработке обусловлены также результаты, полученные в работе [1]. Они дают основание сделать вывод, что температура в дуге (при прочих равных условиях) вообще не зависит от состояния анода. По всей длине столба дуги, горящей на медном водоохлаждаемом и плавящемся стальном анодах, были получены одинаковые значения температур — около 11000 К вблизи катода и около 8000 К вблизи анода ($I_{св} = 100$ А, длина дуги 2 мм). Указанные значения температур вблизи анода значительно ниже, чем приведенные в работах [17, 18]. Как следует из этих работ, температура дуги вблизи анода из хромоникелевой стали, рассчитанная по относительной интенсивности свечения спектральных линий паров CaI и CaII, составляла около 5600 К (при $I_{св} = 250$ А), а рассчитанная по интенсивности континуума — около 14100 К (при $I_{св} = 70$ А). В некоторых работах [19–24] лишь по наличию в спектрах излучения дуги спектральных линий паров анода делается вывод об их присутствии в столбе дуги. Исходя

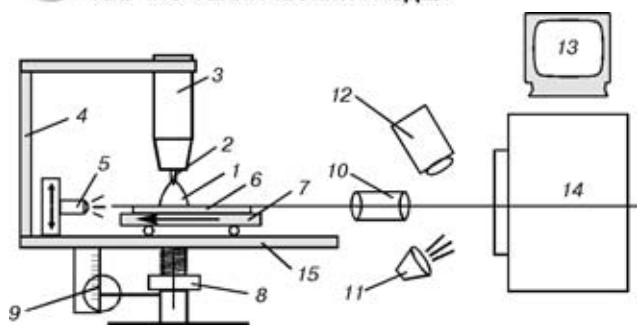


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования дуги: 1 — дуга; 2 — вольфрамовый электрод; 3 — горелка; 4 — станина; 5 — лазерный излучатель; 6 — анод (плавящийся или неплавящийся); 7 — стол; 8 — механизм аксиального перемещения анода; 9 — оптический измеритель расстояния; 10 — оптическая система; 11 — осветитель; 12 — телекамера; 13 — монитор; 14 — спектрограф; 15 — основание

из этого, авторы выполняли теоретические расчеты для двух- и трехкомпонентной плазмы и оценивали влияние паров анода на характеристики дуги [23, 24]. Поскольку экспериментально установлено [7, 8, 17, 18, 25], что пары материала анода не проникают в центральные участки столба дуги, то температура, рассчитанная по их свечению, может соответствовать лишь периферийной области дугового промежутка. Исходя из этого, методику определения температуры столба дуги, горящей на плавящемся аноде, по свечению спектральных линий паров материала анода следует считать некорректной.

Обращает внимание и весьма значительный разброс значений температуры дуги, полученных по спектральным линиям ArI и ArII [1, 14, 26], который может быть вызван погрешностями в методиках экспериментов.

Для повышения точности измерений при определении аксиального распределения температуры в дуге, горящей на плавящемся титановом аноде, была изменена методика эксперимента по сравнению используемой в работах [7, 8]. Это позволило выполнить съемку спектра излучения реальной сварочной дуги. В экспериментальной установке, представленной на рис. 1, сварочная горелка 3 с катодом 2 жестко закреплялась на основании 15 с помощью станины 4. По основанию перемещался сварочный стол 7, на котором располагали анод 6 (плавящийся титановый или неплавящийся медный водоохлаждаемый). Лазерным излучателем 5 освещали торец анода 6 и совмещали плоскость анода с кромкой щели спектрографа 14. Для этого использовали механизм аксиального перемещения анода 8 и оптическую систему 10. Изображение плоскости анода и щели спектрографа передавалось с десятикратным увеличением телекамерой 12 на монитор 13, снабженный координатной сеткой. Для повышения контрастности изображения щели спектрографа при настройке использовали осветитель 11. Съемку спектра столба дуги 1 в заданном сечении выполняли в процессе сварки, при этом расстояние от плоскости анода до заданного сечения контролировали с точностью до 0,1 мм оптическим измерителем расстояния 9. Скорость сварки составляла 8 м/ч.

Поперечные спектры дуги фотографировали на участках, расположенных через 0,5 мм по длине ду-

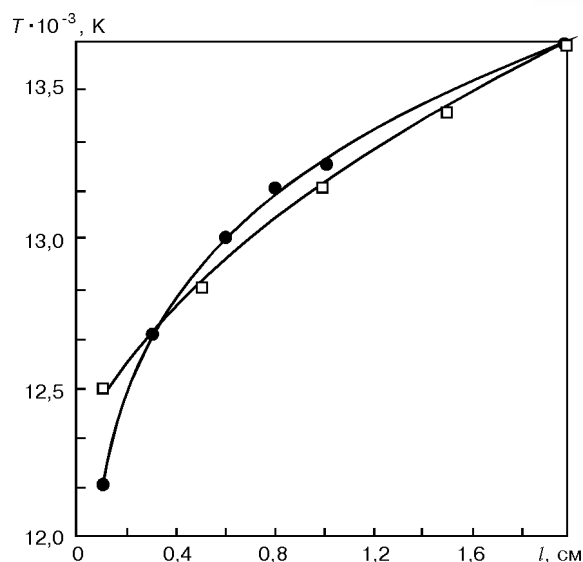


Рис. 2. Аксиальное распределение температуры в столбе дуги: □ — титановый анод; ● — медный анод; l — расстояние от анода

ги с помощью спектрографа с шириной щели 0,28 мм. Температуру дуги определяли по излучению континуума, так как этот метод менее подвержен случайным ошибкам. Использовали излучение континуума на длине волны $\lambda = 431,5$ нм, которое попадает в интервал $\lambda = 430 \dots 480$ нм, где интенсивность континуума аргоновой плазмы постоянна и не зависит от частоты излучения [27]. Коэффициент излучения для континуума в этой области частот записывается в следующем виде [2]:

$$\epsilon_v = 6,36 \cdot 10^{-54} \xi(v, T) n_e n_i / (kT)^{1/2} [\text{Вт}/(\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1})],$$

где $\xi(v, T)$ — функция, учитывающая отклонение данного атома от водородной модели; n_e, n_i — концентрация соответственно электронов и ионов; T — температура плазмы дуги; k — постоянная Больцмана. Для аргона температурная зависимость $\xi(v, T)$ весьма мала и ею можно пренебречь [27]. В указанном выше интервале частот спектра $\xi(v, T) \approx \text{const}$. Абсолютное значение этой величины по [2, 27] можно считать равным 2,3. Для изучения распределения температуры в дуге по выражению, приведенному выше, строилась теоретическая зависимость коэффициента излучения континуума от температуры. Состав аргоновой плазмы (n_e, n_i) в зависимости от температуры с наиболее полным учетом энергетических уровней рассчитан в работе [28]. Для экспериментального определения коэффициента излучения континуума и вычисления затем температуры дуги по рассчитанной теоретической зависимости $\epsilon(T)$, в качестве эталона излучения использовали аргоновую дугу, горящую на медном водоохлаждаемом аноде [3, 4]. Для получения локальных параметров плазмы по радиусу столба дуги неоднородность дугового разряда учитывали путем численного решения уравнения Абеля [2]. Пересчет наблюдаемых распределений $\epsilon_v(x)$ от центра к периферии столба дуги (в каждом его сечении) в радиальные коэффициенты излучения производили по 20 точкам с использованием таблиц из [29]. Переход от радиальных распределений

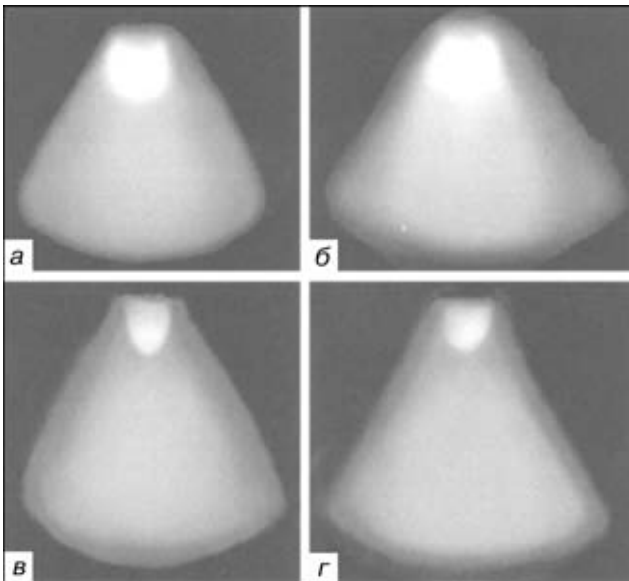


Рис. 3. Аргоновая дуга длиной 5 мм, горящая на медном водоохлаждаемом (а, в) и плавящемся титановом (б, г) анодах при $I_{св} = 100$ А: а, б — светофильтр с $\lambda_{max} = 421$ нм; в, г — то же с $\lambda_{max} = 650$ нм

коэффициентов излучения континуума к радиальному распределению температуры выполняли с помощью компьютерной обработки данных.

Одновременно со съемкой спектров дуги спектрографом проводили синхронную съемку дуги видеокамерой по методике, описанной в работе [30], затем отснятый материал просматривали и фотографировали изображение с экрана монитора.

При исследовании температуры дуги, горящей на плавящемся аноде размером $100 \times 50 \times 4$ мм из технического титана марки ВТ1-0, были выбраны те же режимы, что и в работах [3, 4, 6]. В этих работах изучали распределение температуры в дуге, горящей на медном водоохлаждаемом аноде при следующем режиме: $I_{св} = 100$ А, длина дугового промежутка — 5 мм, диаметр вольфрамового катода — 3 мм, угол его заточки — 30° . Это позволило сравнить аксиальное распределение температуры в дугах, горящих на плавящемся титановом и медном водоохлаждаемом анодах (рис. 2), а также структуру этих дуг (рис. 3). Как видно из рис. 2, значения температуры по длине дуги от катода к аноду совпадают для обоих типов анодов, вплоть до расстояния 1 мм от анода. В прианодном участке температура дуги, горящей на плавящемся титановом аноде, выше, что, по-видимому, вызвано наличием более высокой температуры в активном пятне плавящегося титанового анода. В то же время строение обеих дуг одинаково. Это видно из фотографий дуг, снятых со светофильтром, пропускающим излучение спектральных линий ArI, ArII и континуума (рис. 3, а, б), а также только излучение континуума аргоновой плазмы (рис. 3, в, г). В первом случае у торца катода наблюдается ярко светящееся ядро, наличие которого обусловлено усиленным свечением ионных линий аргона [5]. Во втором случае виден торец катода, погруженный в плазму.

Полученные результаты (с учетом данных работ [7, 8]) позволяют сделать вывод о том, что аксиаль-

ное распределение температуры в сварочной аргоновой дуге с вольфрамовым катодом зависит от состояния анода. В области, прилегающей к аноду, температура дуги выше в случае использования плавящегося анода. Для титанового анода она составляет 12600 К. В то же время строение дуги от состояния анода не зависит.

1. Glickstein S. S. Temperature measurements in a free burning arc // *Welding J.* — 1976. — **55**, № 8. — P. 222–229.
2. Мечев В. С., Ерошенко Л. Е. Определение температуры плазмы дугового разряда в аргоне // *Автомат. сварка.* — 1970. — № 8. — С. 1–6.
3. Мечев В. С., Ерошенко Л. Е. Радиальное распределение температуры электрической дуги в аргоне // *Там же.* — 1975. — № 3. — С. 6–9.
4. Мечев В. С., Ерошенко Л. Е. Аксиальное распределение температуры электрической дуги в аргоне // *Там же.* — 1975. — № 6. — С. 14–17.
5. Мечев В. С., Ерошенко Л. Е. Исследование спектра излучения аргоновой плазмы вблизи электродов // *Там же.* — 1972. — № 8. — С. 1–5.
6. Мечев В. С., Ерошенко Л. Е. Параметры плазмы дугового разряда вблизи испаряющихся электродов // *Теплофизика высоких температур.* — 1972. — **10**, № 5. — С. 926–930.
7. Мечев В. С., Ерошенко Л. Е. Параметры столба дуги в аргоне вблизи изделия при сварке неплавящимся электродом // *Автомат. сварка.* — 1984. — № 1. — С. 25–30.
8. Ерошенко Л. Е., Мечев В. С., Демьянчук А. С. Исследование приэлектродного участка аргоновой дуги у испаряющегося анода // *Журн. прикл. спектроскопии.* — 1979. — **30**, вып. 1. — С. 7–10.
9. Латиш И. Л. Определение температуры сварочной дуги по атомным линиям меди // *Свароч. пр-во.* — 1966. — № 8. — С. 1–3.
10. Латиш И. Л. Оптическое исследование сильноточной Fe-дуги // *Там же.* — 1968. — № 1. — С. 3–5.
11. Латиш И. Л. Оптическое исследование радиального распределения температуры и электропроводности плазмы в сильноточной Fe-дуге // *Там же.* — 1971. — № 4. — С. 5–6.
12. Латиш И. Л., Туркин П. С., Самсонов В. И. Влияние плавикового шпата на структуру дуги, горящей в атмосфере воздуха // *Там же.* — 1978. — № 4. — С. 1–2.
13. Латиш И. Л., Туркин П. С., Самсонов В. И. Влияние плавикового шпата на радиальное распределение температуры и электропроводности электрической дуги, горящей в воздухе // *Там же.* — 1983. — № 4. — С. 8–10.
14. Shaw C. B. Diagnostic studies of the GTAW arc // *Welding J.* — 1975. — **54**, № 2. — P. 33–44.
15. Ерошенко Л. Е. Ширина щели спектрографа при определении температуры дугового разряда // *Спектроскопия, спектральный анализ и технико-экономический эффект от их применения.* — Киев: О-во «Знание», 1977. — С. 4–9.
16. Мечев В. С., Ерошенко Л. Е. Электропроводность электрической дуги в аргоне // *Автомат. сварка.* — 1974. — № 7. — С. 13–16.
17. Свойства короткой аргоновой дуги и ее взаимодействие с плавящимся анодом / Ю. М. Белов, Т. А. Блохина, В. М. Гольдфарб, Е. В. Ильина // *Физика, техника и применение низкотемпературной плазмы.* — Алма-Ата, 1970. — С. 288–292.
18. Белов Ю. М., Гольдфарб В. М., Ильина Е. В. Характеристика короткой аргоновой дуги с плавящимся стальным анодом // *Физика и химия обраб. материалов.* — 1972. — № 5. — С. 127–130.
19. Dunn G. J., Allemand C. D., Eager T. W. Metal vapors in gas tungsten arcs: Pt 1. Spectroscopy and monochromatic photography metallurgical transactions. A // 1986. — **17**, № 7–12. — P. 1851–1863.
20. Metcalfe J. C., Quigley B. C. Arc and pool instability in GTA welding // *Welding J.* — 1977. — **56**, № 5. — P. 133–139.
21. Mills G. S. Fundamental mechanisms of penetration in GTA welding // *Ibid.* — 1979. — **58**, № 1. — P. 21–24.
22. Glickstein S. S. Arc physics and weld pool behavior. — Cambridge: Welding Institute, 1980. — 136 p.
23. Dunn G. J., Eager T. W. Metal vapors in gas tungsten arcs: Pt II. Theoretical calculations of transport properties // *Metallurgical Transactions. A.* — 1986. — **17**, № 7–12. — P. 1865–1871.



24. *Расчет* состава двухкомпонентной равновесной плазмы // Е. И. Романенков, В. А. Виноградов, В. В. Гума, Н. В. Орлова // Автомат. сварка. — 1975. — № 4. — С. 27–29.
25. *Ерошенко Л. Е., Прилуцкий В. П., Замков В. Н.* Исследование свечения паров анода в дуге при сварке титана вольфрамовым электродом в аргоне по слою флюса // Там же. — 1997. — № 11. — С. 11–13.
26. *Любавский К. В., Сидельников Ю. В., Старченко Е. Г.* Спектральное исследование сварочной дуги в аргоне // Физика и химия обраб. материалов. — 1969. — № 6. — С. 133–135.
27. *Асиновский Э. И., Батенин В. М.* Экспериментальное исследование непрерывного спектра плазмы аргона // Теплофизика высоких температур. — 1965. — 3, № 4. — С. 530–535.
28. *Drellishak K. S., Knopp C. F., Cambel A. B.* Practition functions and thermodynamic properties of argon plasma // Physics of Fluid. — 1963. — 6, № 9. — P. 1280–1288.
29. *On the determination of the radial intensity distribution of radiation in cylindric plasma* / A. Bielski, W. Kaczmarek, J. Kybrycht, J. Wolnikowski // Acta Phys. Pol. — 1968. — № 5. — P. 701–709.
30. *Ерошенко Л. Е., Прилуцкий В. П., Замков В. Н.* Видеоспектральная методика исследования сварочной дуги в аргоне // Автомат. сварка. — 1994. — № 7/8. — С. 6–8, 14.

The spectral method was used to investigate the real TIG welding arc burning between non-consumable tungsten electrode and consumable titanium and copper water-cooled anodes. Experimental data have been obtained on distribution of temperature in the arc column along the arc radius near the anode. It is shown that the axial temperature distribution in the arc column depends upon the state of the anode. In a region adjoining the anode the arc temperature is higher in the vicinity of the consumable anode.

Поступила в редакцию 13.07.2001

21–26 мая
2001 г.

«ДИАГНОСТИКА ТРУБОПРОВОДОВ»

г. Москва

3-я Международная конференция

ТЕМАТИКА

Диагностика линейной части магистральных газо- и нефтепроводов
Диагностика промышленных трубопроводов
Диагностика промышленного оборудования
Диагностика запорной арматуры
Диагностика оборудования компрессорных, насосных и распределительных станций
Прочность и оценка остаточного ресурса трубопроводов и оборудования
Проблемы продления ресурса оборудования и объектов
Проблемы защиты от коррозии
Организация мониторинга

Новые разработки в области диагностических средств
Новые технологии в эксплуатации компрессорных станций
Внедрение методов и средств технической диагностики, опыт эксплуатации
Проблемы экологического мониторинга
Обучение и сертификация персонала
Сертификация средств контроля
Стандартизация в области НК и ТД

В рамках конференции состоится выставка приборов и оборудования, услуг и материалов для диагностики трубопроводов

ОРГАНИЗАТОРЫ ВЫСТАВКИ

Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике
Правительство Москвы
Министерство топлива и энергетики РФ
Министерство науки и технологии РФ
Российская академия наук
ОАО «Газпром»

ОАО «Лукойл»
ОАО «Сибнефтепровод»
Государственная академия нефти и газа
ПО «Спецнефтегаз»
ЗАО «МНПО Спектр»



По вопросам участия просьба обращаться в оргкомитет по адресу:
Россия 119048, Москва, ул. Усачева, 35, оргкомитет конференции
Тел.: (095) 245 57 68 (Филиков В. Н.), (095) 245 51 83 (Войнева Л. Б.), (095) 245 31 94 (Гребенкина Т. Ф.),
(095) 245 57 17 — выставка (Туробов Б. В.). Факс (095) 224 68 88; E-mail: spectr@co.ru