



СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ВОЛЬФРАМОВОГО ЭЛЕКТРОДА ПРИ СВАРКЕ ТИТАНА В УЗКИЙ ЗАЗОР С МАГНИТОУПРАВЛЯЕМОЙ ДУГОЙ

В. Ю. БЕЛОУС, канд. техн. наук, С. В. АХОНИН, д-р техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложена система автоматического регулирования положения вольфрамового электрода в разделке при сварке в узкий зазор титана вольфрамовым электродом с магнитоуправляемой дугой, использующая непосредственное измерение напряжения дуги при ее отклонении в крайние положения. Экспериментально установлена зависимость между смещением вольфрамового электрода от центра разделки и амплитудой колебаний напряжения дуги.

Ключевые слова: сварка ТИГ, титановые сплавы, вольфрамовый электрод, смещение вольфрамового электрода от центра стыка, системы слежения

Сварка в узкий зазор (СУЗ) вольфрамовым электродом является производительным и экономичным способом соединения титана толщиной более 16 мм. По сравнению с дуговой сваркой в V- или U-образную разделку способ СУЗ имеет определенные технологические преимущества — уменьшение ширины шва и зоны термического влияния, а также снижение массы наплавленного металла, что особенно важно при сварке титана.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработана технология СУЗ титана и сплавов на его основе вольфрамовым электродом с магнитоуправляемой дугой [1]. Применение внешнего управляющего магнитного поля позволило перераспределять тепло дуги, которое вводится в сварное соединение титана, достичь надежного оплавления вертикальных стенок узкой разделки и обеспечить качественное формирование сварного соединения.

В соответствии с указанной технологией сварка выполняется вольфрамовым электродом, который опущен в разделку, при этом защитное сопло расположено над свариваемыми кромками, что позволяет выполнять разделку шириной 10 мм. Магнитопровод электромагнита совмещен с направляющей для подачи присадочной проволоки и находится в разделке перед вольфрамовым электродом. Электромагнит создает магнитное поле, силовые линии которого в зоне дуги главным образом направлены вдоль линии сварки, при этом значение магнитной индукции достигает 12 мТл. Такое магнитное поле является поперечным по отношению к дуге, а его направление с определенной частотой меняется на противоположное.

СУЗ протяженных прямолинейных стыков, как правило, сопровождается нежелательными поперечными смещениями вольфрамового электрода

по отношению к расчетной центральной плоскости стыка (от центра стыка). Причиной этого могут быть отклонение фактического направления сварки от расчетной центральной плоскости стыка, деформации свариваемых деталей, возникающие в процессе сварки в результате воздействия сварочного термического цикла и др. Эти смещения могут быть значительными и привести к замыканию вольфрамового электрода на боковую стенку разделки. В случае смещения вольфрамового электрода от центра стыка при СУЗ может нарушиться равномерность оплавления боковых стенок разделки, что приведет к образованию непроваров и несплавленных в шве, а также формированию дефектной поверхности наплавленного слоя.

Поэтому при разработке технологии СУЗ с магнитоуправляемой дугой для формирования качественного сварного соединения необходимо оценить влияние смещения вольфрамового электрода от центра стыка на процесс сварки, а именно, на распределение тока в боковых стенках, разделки, напряжение на дуге и формирование сварного шва. Представляется перспективным использование сварочной дуги, которая перемещается под воздействием внешнего управляющего магнитного поля, для контроля за смещением электрода от центра стыка.

Этому и посвящена настоящая работа. При этом исходили из того, что применение внешнего управляющего магнитного поля при СУЗ приводит к перераспределению энергии сварочной дуги, которая вводится в свариваемый металл поочередным отклонением дуги к боковым стенкам разделки под действием силы Лоренца, возникающей вследствие взаимодействия магнитного поля с током дуги. Она отклоняет дугу и смещает анодное пятно на вертикальную боковую стенку разделки. Изменение расстояния между вольфрамовым электродом и боковыми стенками приводит к изменению как высоты смещения анодного пятна на вертикальную боковую стенку, так и значений

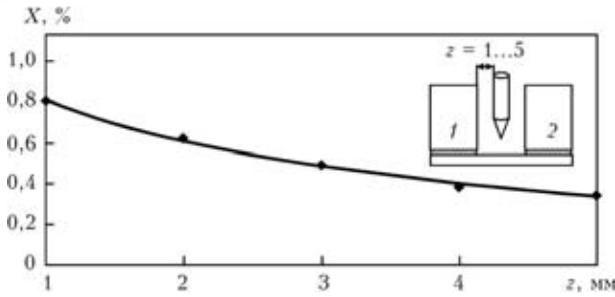


Рис. 1. Изменение доли тока X , протекающего через боковую стенку разделки I_6 , в зависимости от расстояния z между боковой стенкой и плоскостаточным электродом при $B_x = 11,4$ мТл и $I_{св} = 400$ А; $X = I_6/I_{св}$

тока, протекающего через вертикальные боковые стенки. Для оценки нарушения симметричности разогрева боковых стенок при смещении вольфрамового электрода от центра стыка изучали влияние смещения вольфрамового электрода на ток, протекающий через боковые стенки разделки, который измеряли по способу «секционированного анода» [2].

Экспериментально определено, что с изменением расстояния между электродом и боковыми стенками разделки меняется и значение тока, протекающего через боковые стенки 1 и 2 (рис. 1). При смещении вольфрамового электрода от центра стыка значение сварочного тока, протекающего через ближнюю боковую стенку разделки 1, увеличивается, а через дальнюю 2 — уменьшается. Установлено, что смещение электрода на 1 мм приводит к уменьшению доли тока X , протекающего через стенку 1, на 4...5 % и увеличению доли тока, протекающего через 2 стенку, на 15...25 %. Поэтому в результате смещения вольфрамового электрода от центра стыка нарушается симметричность тепловложения в сварное соединение, что приводит к оплавлению боковых стенок разделки на разной глубине и высоте.

Таким образом, при СУЗ магнитоуправляемой дугой для поддержания симметричного тепловложения в боковые стенки и их равного оплавления необходимо обеспечить расположение электрода в центре стыка.

При СУЗ титана вольфрамовым электродом с воздействием внешнего поперечного по отношению к дуге магнитного поля при отклонении дуги в крайнее положение фиксируется уменьшение напряжения на дуге U_d . Это связано с тем, что расстояние между рабочей частью вольфрамового электрода и боковой стенкой L_1 меньше длины дугового промежутка L_0 при отсутствии отклонения сварочной дуги (рис. 2).

В результате смещения вольфрамового электрода от центра стыка происходит уменьшение значений L_1 (рис. 2, б) и увеличение L_2 (рис. 2, в). Соответственно напряжение на дуге U_{d1} , измеренное при отклонении дуги к ближайшей стенке разделки (крайнее левое положение), меньше напряжения на дуге U_{d2} , измеренного при отклонении дуги к дальнейшей стенке (крайнее правое положение). При поочередном отклонении дуги к противоположным боковым стенкам разделки напряжение на дуге изменяется с частотой, соответствующей частоте реверсируемого управляющего магнитного поля, т. е. напряжение на дуге приобретает дополнительные пульсации, амплитуда которых ΔU является разностью U_{d1} и U_{d2} (рис. 3):

$$\Delta U = U_{d2} - U_{d1}. \quad (1)$$

Определено, что при сварке в медной водоохлаждаемой разделке при наложении реверсируемого управляющего магнитного поля, если вольфрамовый электрод установлен в центре стыка, $U_{d1} = U_{d2}$, а их значения пропорциональны длине дугового промежутка L_0 . При сварке в медной водоохлаждаемой разделке при наложении реверсируемого управляющего магнитного поля при смещении вольфрамового электрода от центра разделки ΔU прямо пропорционально смещению вольфрамового электрода от центра стыка и зависит от длины дугового промежутка (рис. 4).

Определено, что значение ΔU зависит также от материала разделки. Так, при сварке титана и сплавов на его основе материал оплавляется и форма поверхности сварочной ванны отличается от

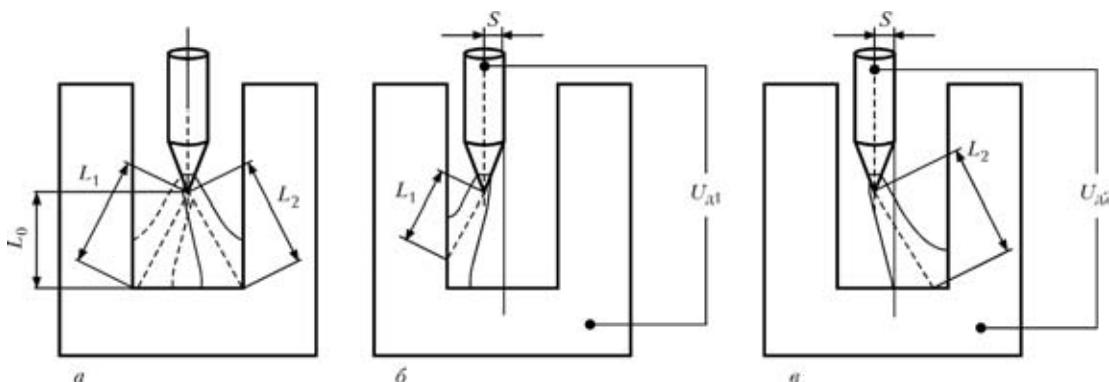


Рис. 2. Схема отклонения сварочной дуги при различном расположении вольфрамового электрода: а — в центре стыка; б, в — смещение S электрода от центра стыка соответственно в левом и правом положении; остальные обозначения см. в тексте

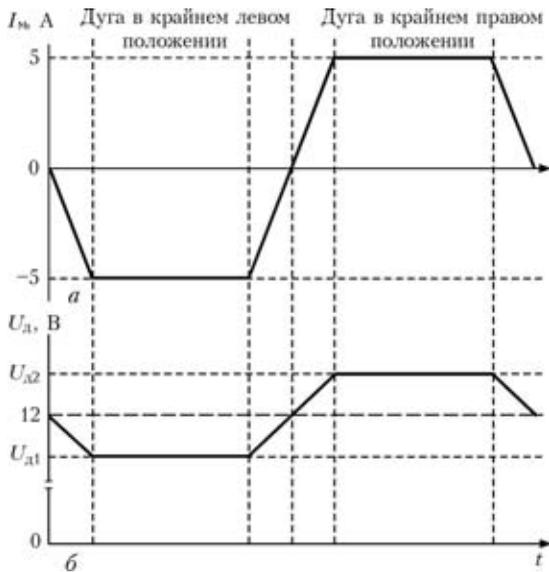


Рис. 3. Влияние смещения вольфрамового электрода на напряжение на дуге U_d : *a* — диаграмма тока I_m , протекающего через катушку электромагнита; *b* — диаграмма напряжения на дуге

первоначальной геометрии разделки, при этом значение ΔU уменьшается. Зависимость ΔU от смещения вольфрамового электрода от центра стыка при СУЗ с магнитоуправляемой дугой титанового сплава ВТ1-0 с использованием присадочной проволоки диаметром 2 мм марки ВТ1-00 показана на рис. 5. При смещении электрода от центра стыка на 2 мм пульсация напряжения ΔU достигает значения 0,4 В.

Проведенный анализ позволил сделать вывод, что при СУЗ с управляющим магнитным полем прямолинейных стыков для формирования качественного сварного соединения необходимо применение следящих систем, которые корректируют поперечные смещения вольфрамового электрода от центра стыка. Анализ образцов сварных швов, выполненных с различным смещением вольфрамового электрода от центра стыка (рис. 6), показал, что качественное формирование их обеспечивается при смещении вольфрамового электрода на расстояние не более 0,5 мм.

Известны системы слежения, использующие в качестве источника информации о смещении линии соединяемых элементов параметры сварочной дуги [3, 4] либо механические или оптические сенсоры. В связи с малой шириной разделки, затрудненным обзором зоны сварки и ограниченным доступом к ней перспективно применение следящих систем, где источниками информации о смещении электрода являются параметры сварочной дуги. В работе [5] предложена система слежения за стыком, в которой применяют магнитное отклонение сварочной дуги и измерение мгновенного значения сварочного тока. Поскольку при СУЗ титана с магнитоуправляемой дугой для

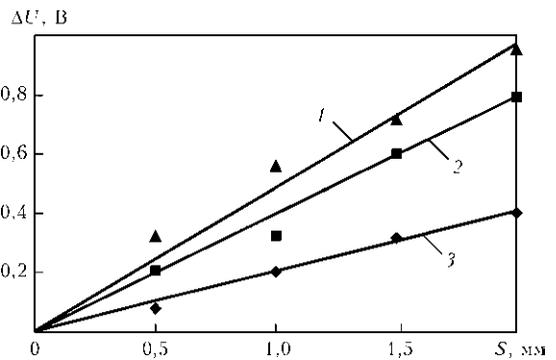


Рис. 4. Зависимость амплитуды пульсаций напряжения на дуге ΔU от смещения электрода S от центра стыка при СУЗ с водоохлаждаемой разделкой: 1 — $L_0 = 5$; 2 — 4; 3 — 3 мГн

обеспечения надежного оплавления боковых стенок разделки используют внешнее магнитное поле, целесообразно также применение системы слежения с использованием магнитного отклонения сварочной дуги и измерение одного из ее параметров — напряжения на дуге.

Изучение воздействия внешнего управляющего магнитного поля на напряжение на дуге при СУЗ позволило предложить систему слежения, использующую один параметр сварочной дуги, — напряжение на дуге — для контроля за положением электрода в центре стыка и длиной дугового промежутка. Функциональная схема разработанной системы слежения за напряжением на дуге и расположением вольфрамового электрода в разделке показана на рис. 7.

Контроллер К1 измеряет напряжение, которое снимается с токоподвода к вольфрамовому электроду. Сигнал, пропорциональный $(U_{d1} + U_{d2})/2$, подается на исполнительный механизм P1, обеспечивающий вертикальное перемещение вольфрамового электрода, присадочной проволоки и электромагнита для поддержания постоянного значения U_d . Сигнал, пропорциональный значению ΔU , подается на исполнительный механизм P2, который обеспечивает поперечное перемещение вольфрамового электрода в целях удержания последнего в центре разделки. Для определения направления поперечного перемещения вольфрамового электрода контроллер К1, измеряющий зна-

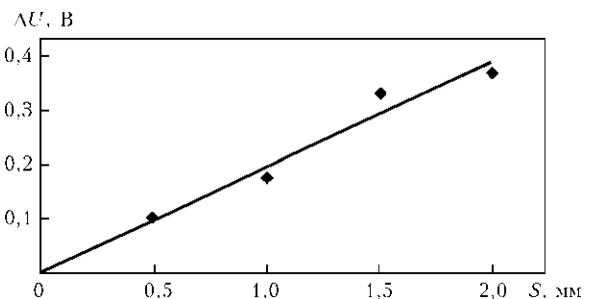


Рис. 5. Зависимость ΔU от смещения электрода S от центра стыка при СУЗ титанового сплава ВТ1-0 ($I_{св} = 400$ А; $U_d = 12$ В; скорость сварки $v_{св} = 8$ м/ч; скорость подачи присадочной проволоки $v_{пр} = 120$ м/ч диаметром 2 мм)

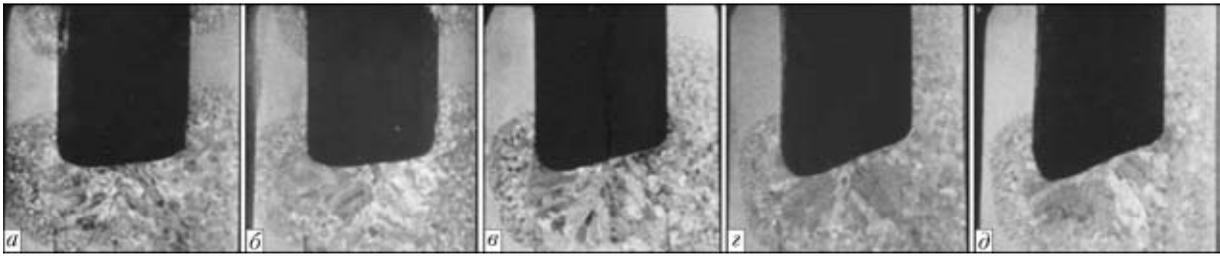


Рис. 6. Формирование поверхности наплавленного слоя при смещении вольфрамового электрода от центра стыка на расстояние 0,2 мм (а), 0,5 (б), 0,7 (в), 1,0 (г) и 1,5 мм (д)

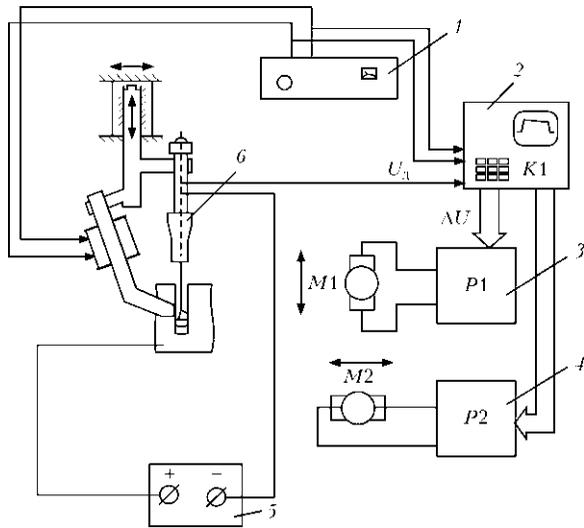


Рис. 7. Функциональная схема системы слежения за напряжением на дуге и расположением вольфрамового электрода в разделке: 1 — устройство управления электромагнитом; 2 — программируемый контроллер; 3, 4 — приводы перемещения электрода вертикально и поперек разделки; 5 — источник питания дуги; 6 — цанга с вольфрамовым электродом; M1, M2 — электродвигатели

чение ΔU , синхронизирован с устройством управления электромагнитом.

Проведенные эксперименты показали эффективность предложенной системы автоматического регулирования напряжения дуги и положения вольфрамового электрода в разделке и подтвердили высокое качество полученных сварных соединений даже при предварительно заданных отклонениях вольфрамового электрода от геометрического центра стыка.

Выводы

1. Установлено, что при СУЗ с внешним управляющим магнитным полем смещение вольфрамового электрода от центра стыка является тем фактором, который существенно влияет на значение тока, протекающего через боковые стенки раздел-

ки, симметричность тепловложения встык и глубину оплавления вертикальных стенок разделки. Смещение электрода на 1 мм способствует уменьшению доли тока, протекающего через дальнюю стенку на 4...5 %, и увеличению доли тока, протекающего через ближнюю стенку, на 15...25 %, а также изменению глубины их оплавления.

2. Экспериментально установлено, что смещение электрода от центра стыка приводит к возникновению разности в уровнях напряжения на дуге с амплитудой до 0,4 В при ее отклонении в крайних положениях, при этом частота колебаний напряжения дуги соответствует частоте реверсирования управляющего магнитного поля. В условиях СУЗ титана и сплавов на его основе определено значение коэффициента пропорциональности между смещением вольфрамового электрода от центра стыка и амплитудой колебаний напряжения на дуге — 0,2 В/мм. Предложена функциональная схема системы автоматического регулирования положения вольфрамового электрода в разделке, использующая непосредственное измерение напряжения на дуге.

1. Paton B. E., Zamkov V. N., Prilutsky V. P. Narrow-groove welding proves its worth on thick titanium // *Welding J.* — 1996. — № 4. — P. 37–41.
2. Связь интегрального значения эффективной мощности несимметричного источника тепла на сегменте с функцией радиального распределения плотности теплового потока / П. А. Тополянский, Б. О. Христофис, С. А. Ермаков, Н. А. Соснин // *Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: Материалы 6-й Междунар. практ. конф.-выставки, С.-Петербург, 13–16 апр. 2004 г.* — С.-Пб: СПбГПУ, 2005. — С. 3–9.
3. Патон Б. Е., Лебедев В. К. *Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки.* — М.: Машиностроение, 1966. — 395 с.
4. Цыбульский Г. А. Боковая коррекция текущего положения сварочного инструмента на основе непрерывного измерения сварочного тока // *Автомат. сварка.* — 1994. — № 7/8. — С. 28–31.
5. Лебедев В. К., Черныш В. П. *Автоматизация сварочных процессов.* — Киев: Выщ. шк., 1986. — 296 с.

A system of automatic regulation of tungsten electrode position in the groove in tungsten electrode narrow gap welding of titanium by magnetically-impelled arc is proposed, in which direct measurement of arc voltage at its deviation to the extreme positions is used. A dependence between shifting of tungsten electrode from the groove center and amplitude of arc voltage oscillations is experimentally established.

Поступила в редакцию 14.03.2011