



## УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ БЕЗДЕФЕКТНЫХ ШВОВ ПРИ СВАРКЕ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В УЗКИЙ ЗАЗОР МАГНИТОУПРАВЛЯЕМОЙ ДУГОЙ

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

Экспериментально изучены условия получения бездефектных швов сваркой в узкий зазор вольфрамовым электродом магнитоуправляемой дугой на низколегированных титановых сплавах. Установлены закономерности отклонения сварочной дуги при различных параметрах процесса сварки.

*Ключевые слова:* титановые сплавы, сварка ТИГ, вольфрамовый электрод, магнитное управление дугой, отклонение дуги, металл шва

Сварка в узкий зазор (СУЗ) вольфрамовым электродом является производительным и экономичным способом соединения титана толщиной более 16 мм. Она имеет определенные технологические преимущества по сравнению со сваркой с V- или U-образной разделкой кромок, а именно, сокращение ширины шва и ЗТВ, снижение объема наплавляемого металла, что особенно важно при сварке титана. Кроме того, СУЗ имеет и организационные преимущества — уменьшение трудоемкости при подготовке кромок свариваемых деталей и существенное повышение производительности труда [1]. Поскольку большая часть тепловой энергии свободно горящей дуги расходуется на повторное проплавление металла шва предыдущего прохода, условием успешной реализации процесса является обеспечение надежного расплавления боковых стенок разделки. Для этого необходимо, чтобы тепло, вводимое в сварное соединение, перераспределялось, что достигается путем механического перемещения вольфрамового электрода и сварочной дуги [2] или воздействием внешнего управляющего магнитного поля на дугу [3].

Схема процесса СУЗ титана с внешним управляющим магнитным полем представлена на рис. 1. Сварку выполняли на постоянном токе прямой полярности вольфрамовым электродом, который был опущен в разделку, при этом защитное сопло находилось над свариваемыми кромками. Магнитное поле в зоне дуги создает электромагнит с сердечником, при сварке он выполняет функции магнитопровода и располагается в узкой разделке. При протекании тока через катушку электромагнита в зоне горения дуги возникает магнитное поле, силовые линии которого сориентированы

преимущественно вдоль направления сварки (рис. 1). Такое магнитное поле является поперечным по отношению к дуге. В результате взаимодействия магнитного поля с током дуги возникает сила Лоренца  $F_a$ , которая отклоняет дугу в направлении действия этой силы. Поочередное отклонение сварочной дуги к боковым стенкам разделки кромок осуществляется сменой полярности тока, протекающего через катушку электромагнита.

Экспериментальное изучение характера формирования сварного шва при СУЗ позволило установить влияние таких параметров управляющего магнитного поля, как частота реверсирования и значение магнитной индукции на форму шва [4]. Однако качество сварного соединения, полученного СУЗ вольфрамовым электродом с магнитоуправляемой дугой, зависит не только от параметров управляющего магнитного поля, но и

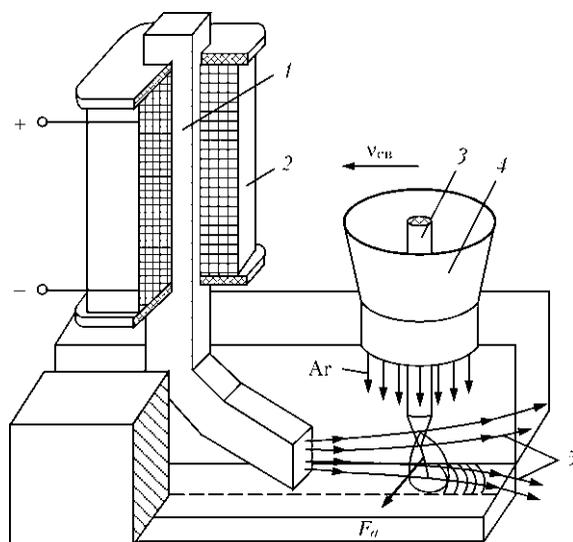


Рис. 1. Схема процесса СУЗ с управляющим магнитным полем: 1 — сердечник электромагнита; 2 — катушка электромагнита; 3 — вольфрамовый электрод; 4 — защитное сопло; 5 — силовые линии управляющего магнитного поля

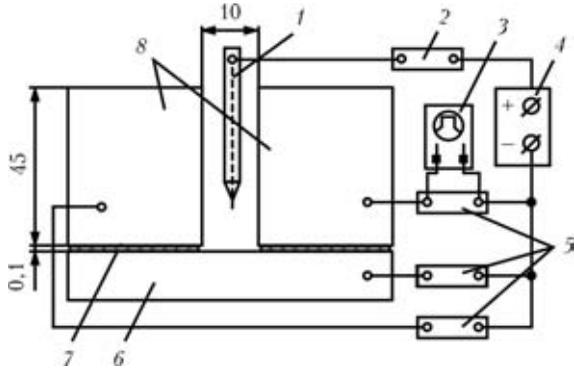


Рис. 2. Схема установки для измерения тока, протекающего через боковые стенки разделки при СУЗ с управляющим магнитным полем: 1 — вольфрамовый электрод; 2 — шунт для измерения сварочного тока; 3 — осциллограф; 4 — источник питания; 5 — шунты для измерения тока, протекающего через боковые и нижнюю стенки; 6 — нижняя стенка разделки; 7 — изолятор; 8 — боковые стенки

от сварочного тока  $I_{св}$ , скорости сварки  $v_{св}$ , напряжения на дуге  $U_{д}$ , формы рабочей части вольфрамового электрода. Поэтому для обеспечения условий качественного формирования сварного соединения необходимо экспериментальным способом изучить закономерности отклонения сварочной дуги при изменении режима сварки и параметров магнитного поля.

Целью настоящей работы было исследование условий формирования бездефектных швов в случае сварки титана при изменяющихся режиме сварки, параметрах магнитного поля, различной форме рабочей части вольфрамового электрода.

Для оценки характера влияния режима сварки на отклонение дуги и выбора его оптимальных пара-

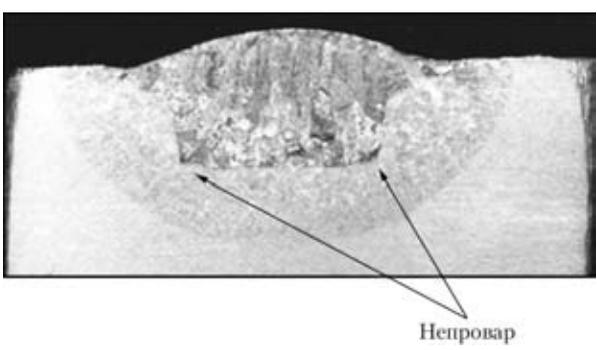


Рис. 3. Макрошлиф наплавки с непроваром в углах разделки (материал — титановый сплав ПТЗВ, присадочная проволока ВТ1-00)

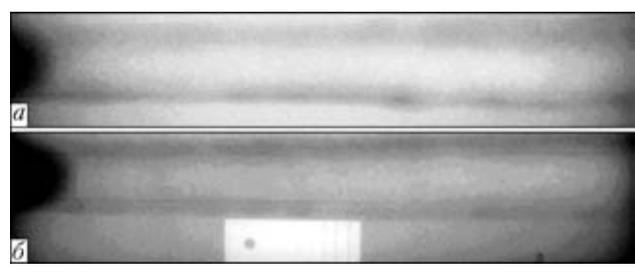


Рис. 4. Рентгеновский снимок швов с непроварами в углах разделки: а, б — см. в тексте

метров применена методика измерения тока, протекающего через боковые стенки разделки по способу «секционированного анода» [5]. Схема установки для измерения тока, протекающего через боковые стенки разделки при СУЗ с управляющим магнитным полем, представлена на рис. 2. Степень отклонения сварочной дуги оценивали по значению тока, протекающего через боковую стенку разделки, с помощью параметра  $X$ :

$$X = \frac{I_6}{I_{св}}$$

где  $I_6$  — ток, протекающий через боковую стенку разделки.

В работе были использованы вольфрамовые электроды, имеющие форму рабочей части в виде конуса или плоскую с шириной 2,5 мм, которые расположены при сварке широкой стороной поперек оси шва.

Для установления необходимого отклонения сварочной дуги проведены исследования макроструктуры сварных швов, выполненных СУЗ, которые позволили установить, что существует высокая вероятность образования непроваров в месте пересечения вертикальной стенки разделки с поверхностью шва предыдущего слоя (рис. 3). Непровары возникают с одной стороны (рис. 4, а) либо по обеим сторонам разделки (рис. 4, б) и могут быть сплошными или прерывистыми.

Анализ температурных условий сварки позволил установить, что трудность обеспечения гарантированного провара в месте пересечения стенки разделки с поверхностью шва предыдущего прохода обусловлена усиленным теплоотводом в процессе сварки на данном участке основного металла. Определено, что для достижения гарантированного расплавления боковой стенки разделки в месте пересечения ее с поверхностью предыдущего шва необходимо сварочную дугу отклонить на такой угол, когда условная середина анодного пятна  $O$  совпадает с точкой пересечения боковой и нижней стенок разделки (рис. 5). При

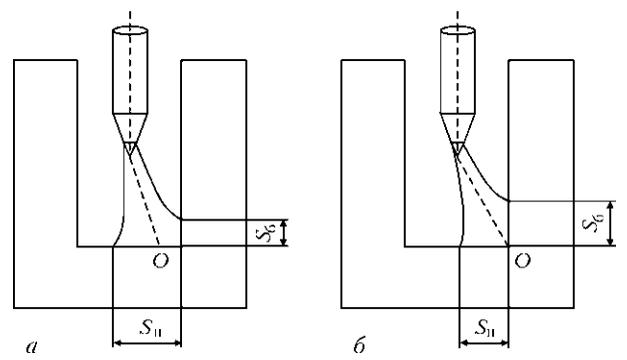


Рис. 5. Схема расположения центра анодного пятна при недостаточном (а) и оптимальном (б) отклонении дуги в разделке ( $S_н$ ,  $S_б$  — расстояние от центра до края анодного пятна соответственно на нижней и боковой стенках)

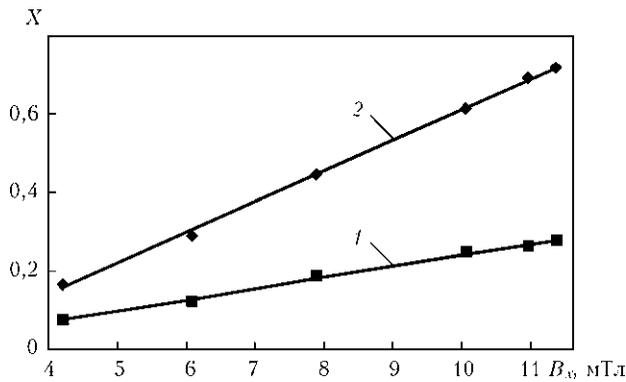


Рис. 6. Зависимость доли тока в боковой стенке разделки от магнитной индукции  $B_x$  при применении вольфрамовых электродов с конической (1) и плоскозаточенной (2) рабочей частью ( $I_{св} = 400$  А)

ниям поперечной составляющей магнитной индукции в направлении линии сварки  $B_x$  (рис. 6).

При использовании электрода, рабочая часть которого выполнена в виде конуса, доля тока в боковых стенках составляет не более 30 % сварочного тока, что исходя из экспериментальных данных недостаточно для расплавления вертикальных стенок разделки и качественного формирования шва.

Для предотвращения образования непроваров соотношение  $X$  должно составлять не менее 0,5, что соответствует расположению середины анодного пятна в углу разделки кромок. Это условие выполняется при использовании электродов с плоскозаточенной рабочей частью. При прочих равных условиях с увеличением сварочного тока

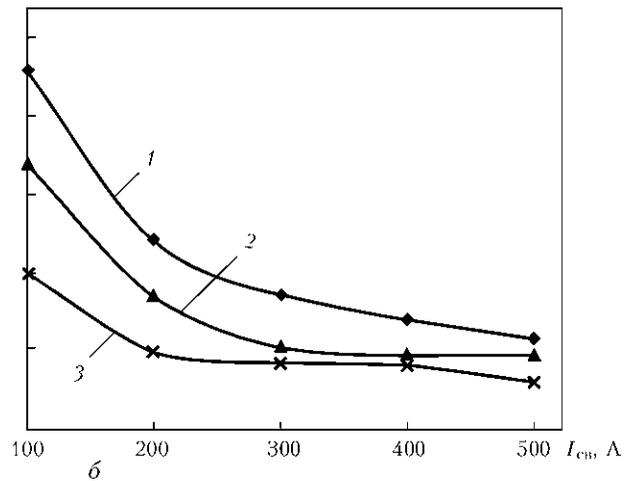
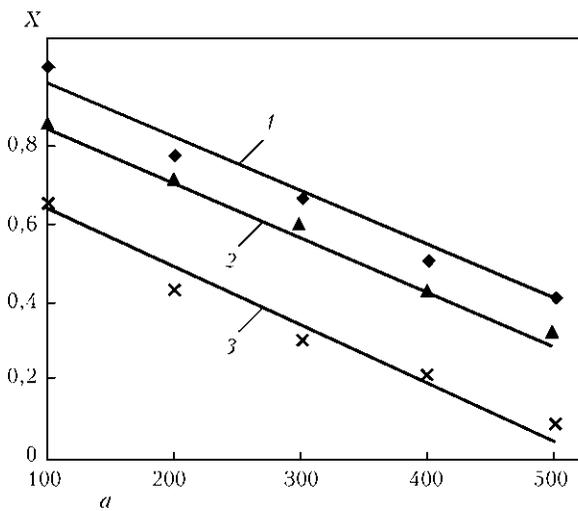


Рис. 7. Зависимость доли тока, протекающего через боковую стенку, от сварочного тока при использовании электрода с плоскозаточенной (а) и конической (б) рабочей частью: 1 —  $B_x = 11,4$ ; 2 — 10,1; 3 — 6,1 мТл

СУЗ в случае равенства  $S_n$  и  $S_0$  значения тока, протекающего через боковые и нижнюю стенки разделки, равны, т. е. доля тока, протекающего через боковые стенки, будет составлять 50 % общего сварочного тока.

Измерения значений тока, протекающего через боковые стенки разделки, позволили установить, что их значения прямо пропорциональны значе-

ния доли тока в боковых стенках снижается (рис. 7), т. е. смещение анодного пятна уменьшается.

Увеличение длины дугового промежутка приводит к росту значения тока, протекающего через боковые стенки, т. е. отклонение сварочной дуги увеличивается (рис. 8).

Таким образом, проведенные исследования позволили установить, что для формирования бездефектных швов при СУЗ низколегированных титановых сплавов с управляющим магнитным полем необходимо создать в зоне горения дуги магнитное поле с индукцией не менее 8 мТл при сварочном токе 400 А и длине дугового промежутка 4 мм. Результаты исследований макроструктуры сварных швов, выполненных на низколегированных титановых сплавах при этих параметрах режима сварки, свидетельствовали об отсутствии в металле шва непроваров и несплавлений.

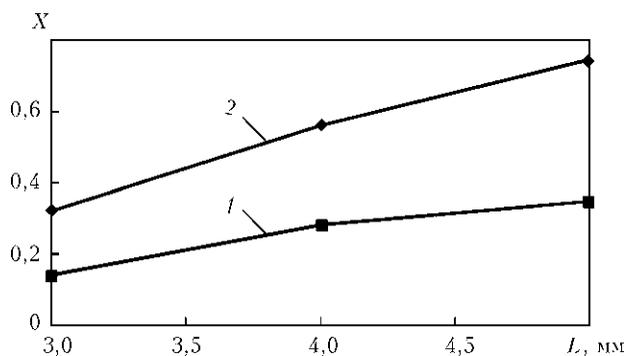


Рис. 8. Зависимость доли тока в боковой стенке разделки от длины дугового промежутка  $L$  при использовании электрода с конической (1) и плоскозаточенной (2) рабочей частью при  $B_x = 11,5$  мТл;  $I_{св} = 400$  А

### Выводы

1. Экспериментально изучены закономерности отклонения сварочной дуги при СУЗ вольфрамовым электродом магнитоуправляемой дугой при изме-



нении режима сварки и параметров магнитного поля. Оптимизированы условия выполнения швов без дефектов.

2. Определено, что для СУЗ вольфрамовым электродом с магнитоуправляемой дугой требуется применение вольфрамовых электродов с плоской специальной формой рабочей части шириной 2,5 мм.

3. Установлено, что отклонение сварочной дуги от центральной плоскости разделки прямо пропорционально значению поперечной составляющей индукции магнитного поля  $B_x$  и длине дугового промежутка и обратно пропорционально значению сварочного тока.

1. *Malin V.* Monograph on narrow-gap welding technology. — New York, 1987. — 83 p. — (Welding Research Council Bulletin).

2. *Кацуёси Хори, Мицуаки Ханэда.* Дуговая сварка в узкий зазор // Журн. Япон. свароч. об-ва. — 1999. — № 3. — С. 41–62.
3. *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.
4. *Белоус В. Ю., Ахонин С. В.* Влияние параметров управляющего магнитного поля на формирование сварных швов титановых сплавов при сварке в узкий зазор // *Автомат. сварка.* — 2007. — № 4. — С. 3–6.
5. *Связь интегрального значения эффективной мощности осесимметричного 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, Санкт-Петербург, 13–16 апр. 2004 г. — С.-Пб.: Изд-во СПбГПУ, 2005. — С. 3–9.*

Conditions for providing defect-free welds on low titanium alloys by using narrow-gap TIG welding with the magnetically controlled arc have been experimentally studied. Mechanisms of deviation of the welding arc at different parameters of the welding process have been established.

Поступила в редакцию 20.09.2010

## НОВЫЕ КНИГИ

**ТИТАН: технологии, оборудование, производство:** Сб. ст. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, 2011. — 250 с., мягкий переплет, формат 200×297 мм.

В сборнике представлены статьи, опубликованные в журналах «Современная электрометаллургия» и «Автоматическая сварка» за период 2005–2010 гг., по электрометаллургии и сварке титана и его сплавов. Авторами статей являются известные в Украине и за рубежом ученые и специалисты в области производства и сварки титана и его сплавов. Сборник предназначен для научных сотрудников, преподавателей, аспирантов и инженеров, занимающихся проблемами производства, обработки и потребления титановых сплавов.

**Контактная сварка и другие виды сварки давлением:** Сб. ст. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, 2011. — 150 с., мягкий переплет, формат 200×297 мм.

Сборник объединяет статьи, опубликованные в журнале «Автоматическая сварка» за период 2005–2010 гг., по проблемам контактной стыковой сварки оплавлением и другим способам сварки давлением. Авторами статей являются известные в Украине и за рубежом ученые и специалисты в области сварки давлением. Сборник предназначен для научных сотрудников, преподавателей, аспирантов и инженеров, занимающихся проблемами сварки давлением сталей, алюминиевых и титановых сплавов, интерметаллидов и других материалов.

**Заказы на книги просьба направлять в редакцию журнала:**

**тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-54-84, e-mail: journal@paton.kiev.ua.**

**Книги реализуются в печатном виде (доставка заказной бандеролью)**

**и в электронном виде в \*.pdf формате**

**(отправка по электронной почте с закрытием оплаты по акту выполненных работ).**