



УДК 621.791.75

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЯЮЩЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ СВАРНЫХ ШВОВ ПРИ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В УЗКИЙ ЗАЗОР

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

Отмечена эффективность применения аргонодуговой сварки неплавящимся электродом в узкий зазор титановых сплавов толщиной более 20 мм. Показано, что для обеспечения надежного сплавления в соединениях, полученных сваркой с использованием поперечного переменного магнитного поля, значение магнитной индукции в зоне дуги должно составлять 8...9 мТл. Минимальное проплавление боковых стенок достигается при частоте поля 10 Гц.

*Ключевые слова:* аргонодуговая сварка, узкощелевая разделка, титановый сплав, вольфрамовый электрод, проплавление, боковая стенка, магнитная индукция, частота поля

Для соединения титановых сплавов толщиной 20 мм и более эффективна аргонодуговая сварка неплавящимся электродом в узкий зазор. Основной проблемой, возникающей при этом, является обеспечение надежного сплавления вертикальных стенок узкого зазора с наплавляемым валиком, а также валиков между собой. Для ее решения существуют различные технологические приемы: использование режимов сварки с повышенной погонной энергией; поочередная раскладка валиков [1]; механические колебания электрода от кромки к кромке [2]; наложение поперечного магнитного поля [3]. Однако, поскольку процесс сварки с повышенной погонной энергией характеризуется малой производительностью, сварные швы, выполненные на таком режиме, имеют зону термического влияния (ЗТВ) большой ширины. Поскольку титан и сплавы на его основе относятся к немагнитным материалам, то наиболее эффективным способом обеспечения надежности и равномерности расплавления боковых стенок зазора является управление отклонением сварочной дуги посредством наложения внешнего управляющего поперечного переменного магнитного поля (далее — магнитного поля).

В работе [3] описана сварка титана в узкий зазор вольфрамовым электродом с управляющим магнитным полем. При указанном способе сварки магнитное поле создается электромагнитом, имеющим магнитопровод специальной формы, который опущен в разделку (рис. 1), при этом силовые линии поперечного магнитного поля направлены параллельно оси сварного шва.

В настоящее время в литературе отсутствуют данные о влиянии параметров управляющего магнитного поля на формирование сварных швов при сварке в узкий зазор. При сварке с управляющим магнитным полем важнейшими его параметрами, влияющими на отклонение сварочной дуги, являются магнитная индукция  $B_x$  в зоне дуги (составляющая магнитной индукции вдоль оси  $x$ ) и частота  $W$  переменного магнитного поля.

Цель настоящей работы — исследование закономерностей изменения формы сварных швов в зависимости от параметров магнитного поля, что позволит из их числа выбрать оптимальные, при которых формируется качественный наплавленный валик.

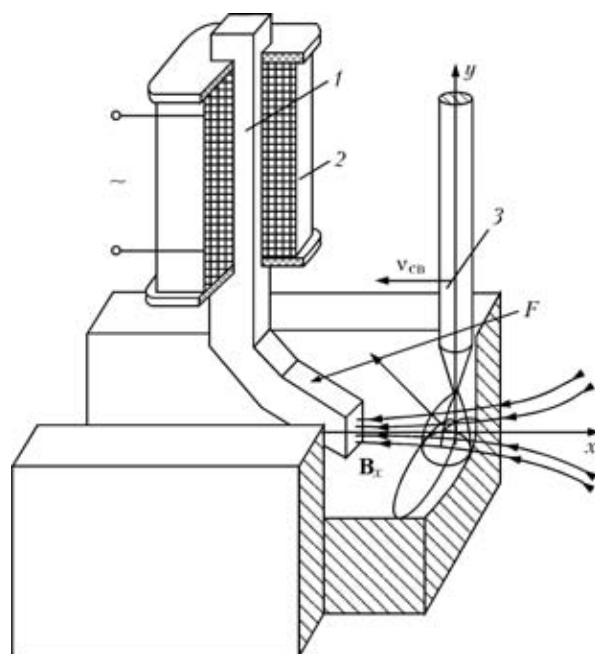


Рис. 1. Схема сварки в узкий зазор вольфрамовым электродом: 1 — сердечник электромагнита; 2 — катушка; 3 — электрод;  $F$  — сила, отклоняющая столб дуги;  $v_{св}$  — скорость сварки

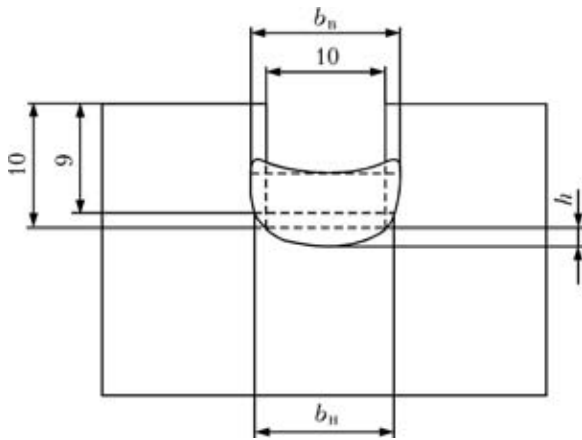


Рис. 2. Схема наплавки валика в узкий зазор:  $h$  — глубина проплавления основного металла;  $b_в$ ,  $b_н$  — ширина валика соответственно в верхней и нижней части

С этой целью проведен ряд экспериментов по наплавке, имитирующих выполнение заполняющих проходов с последующим измерением размеров полученных сварных швов (рис. 2). Эксперименты проводили в два этапа: на первом — исследовали влияние магнитной индукции на форму поперечного сечения сварного шва при постоянной частоте магнитного поля, а на втором — влияние частоты переменного магнитного поля на форму поперечного сечения сварного шва при постоянном значении магнитной индукции.

Предварительные эксперименты показали, что сварные швы, выполненные без отклонения сварочной дуги, имеют большую глубину проплавления дна разделки и малую ширину шва в его нижней части (рис. 3, а). В этом случае возможно появление в углах разделки непроваров. Определено также, что значительное проплавление бо-

ковых стенок разделки приводит к чрезмерной ширине шва и ЗТВ, при этом могут возникать такие дефекты, как несплавления (рис. 3, б).

В связи с этим в качестве оптимальной формы наплавленного валика при сварке в узкий зазор принята такая, при которой глубина проплавления поверхности предыдущего валика минимальна, а ширина шва в верхней части  $b_в$  равна ширине в нижней его части  $b_н$ , т. е. глубина проплавления боковых стенок по высоте одинакова. В этом случае ЗТВ имеет малую протяженность, а непровары в шве не возникают.

Сварку выполняли на постоянном режиме. Валик высотой 5 мм наплавливали на токе 400 А, что соответствует нижней границе диапазона сварочного тока и позволяет получить сварное соединение, имеющее ЗТВ малой протяженности. Напряжение на дуге составляло  $U_д = 12$  В, скорость сварки  $v_{св} = 8$  м/ч.

Управляющее магнитное поле создавал электромагнит с устройством ОИ-119, разработанным в ИЭС им. Е. О. Патона, генерирующим импульсы переменного тока, близкие по форме к прямоугольным (рис. 4). В ходе экспериментов частоту переменного магнитного поля устанавливали в пределах 2,5...80,0 Гц, а значение магнитной индукции переменного магнитного поля в зоне дуги изменяли от 2 до 12 мТл. Образцы были выполнены из технического титана марки ВТ1-0, присадочная проволока — титановый сплав ОТ4-1. Выбор последнего обусловлен тем, что он содержит в качестве легирующего элемента алюминий, что позволяет методом микрорентгеноспектрального анализа точно определить ширину шва и протяженность зоны сплавления [3]. Измерение ши-

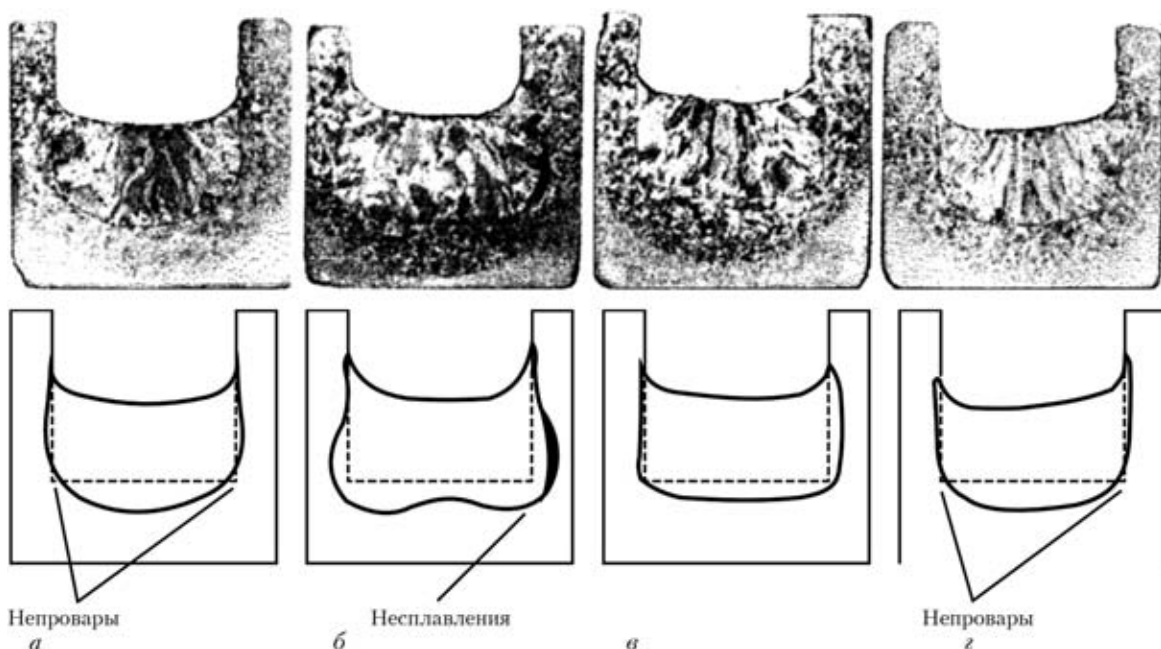


Рис. 3. Макрошлифы валиков, полученных сваркой в узкий зазор (вверху), и схемы форм проваров (внизу): а — валик, полученный без управляющего магнитного поля; б —  $b_в < b_н$ ; в —  $b_в = b_н$ ; г —  $b_в > b_н$

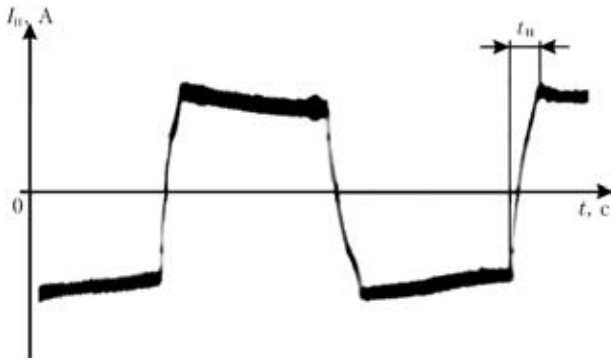


Рис. 4. Осциллограмма импульсов тока намагничивания, протекающего через катушку электромагнита:  $I_n$  — ток намагничивания;  $t_n$  — время нарастания импульса тока

рины валика  $b$  и глубины проплавления  $h$  основного металла выполняли на поперечных шлифах, вырезанных из сварных швов.

Результаты экспериментов показали, что при увеличении магнитной индукции в зоне дуги возрастает степень проплавления боковых стенок узкой разделки в нижней части, т. е.  $b_n$  увеличивается (рис. 5). При  $B_x = 8$  мТл ширина шва в его верхней и нижней части одинакова (рис. 5), при  $B_x < 8$  мТл ширина шва в верхней его части больше, чем в нижней. Макрошлифы наплавов, полученные при  $B_x < 8$  мТл, имеют в углах разделки непровары. При  $B_x = 11...12$  мТл поперечное сечение наплавленного валика приобретает форму, показанную на рис. 3, б. С увеличением магнитной индукции глубина проплавления дна разделки уменьшается (рис. 6).

Таким образом, исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что при  $B_x = 8...9$  мТл достигается оптимальное формирование наплавленного валика, т. е. ширина шва в его верхней и нижней части равны.

Частота переменного магнитного поля также оказывает влияние на форму наплавляемого валика. Результаты экспериментов показали, что наибольшая глубина проплавления боковых стенок разделки достигается при частоте магнитного по-

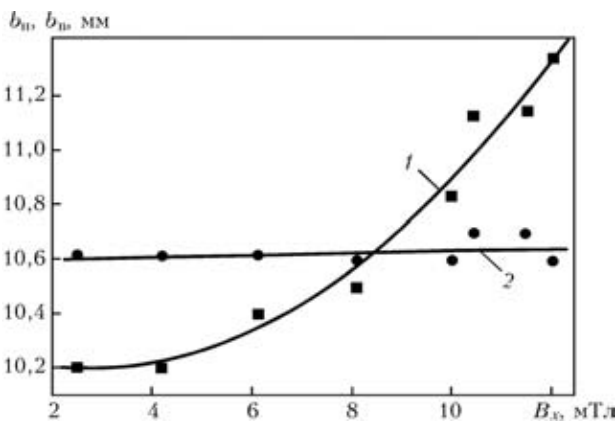


Рис. 5. Зависимость ширины шва, выполненного сваркой в узкий зазор, от магнитной индукции переменного магнитного поля: 1, 2 — ширина шва соответственно внизу иверху

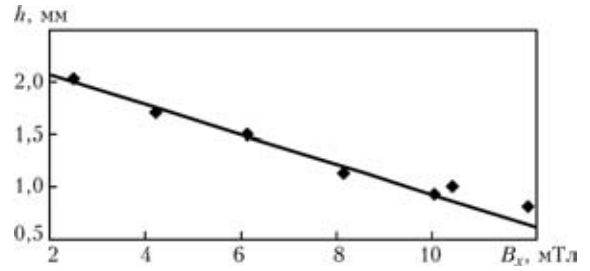


Рис. 6. Зависимость глубины проплавления  $h$  дна узкой разделки от магнитной индукции  $B_x$  переменного магнитного поля

ля 2,5 Гц (рис. 7), а именно, если дуга находится у боковой стенки продолжительное время. В этом случае глубина проплавления боковых стенок разделки зазора в верхней части шва меньше, чем в нижней. Поперечное сечение наплавленных валиков, выполненных при частоте магнитного поля  $W = 2,5...4,0$  Гц, в верхней части шва имеет меньшую ширину, чем в нижней (см. рис. 3, б). Наименьшая глубина проплавления боковых стенок разделки достигается при  $W = 80$  Гц. Форма поперечного сечения наплавленного валика при  $W = 50...80$  Гц сходна с формой валика, полученного без воздействия магнитного поля. Макрошлифы наплавов, выполненных при  $W = 20...80$  Гц, имеют непровары в углах разделки.

Зависимость глубины проплавления дна разделки от частоты переменного магнитного поля минимальна при  $W = 10...20$  Гц (рис. 8). Перегиб кривой связан с тем, что наибольшая глубина проплавления дна разделки при  $W = 2,5...10,0$  Гц имеет место у боковых стенок, а при  $W = 20...80$  Гц — в центре шва. Глубина проплавления дна разделки при частоте магнитного поля  $W = 10...20$  Гц минимальна и составляет около 1 мм; при этом значения этой величины в центре шва и у боковых стенок одинаковы. Кроме того, поперечное сечение валиков, выполненных при  $W = 4...10$  Гц, имеет одинаковую ширину в их верхней и нижней части. Таким образом, при  $W = 10$  Гц формируется валик, у которого глубина проплавления дна разделки минимальна, а ширина в его верхней и нижней части одинакова.

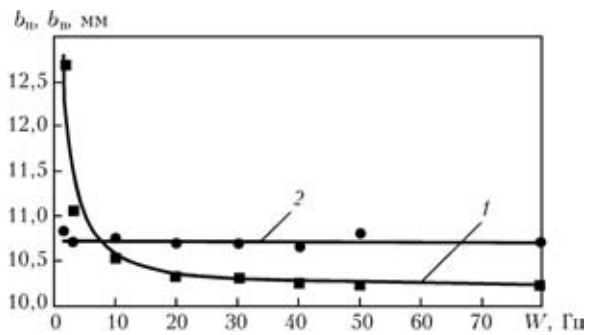


Рис. 7. Зависимость ширины шва, выполненного сваркой в узкий зазор, от частоты  $W$  переменного магнитного поля: 1, 2 — см. рис. 5

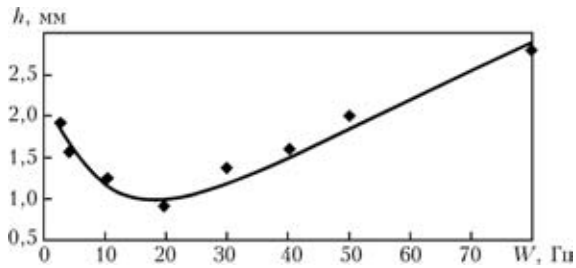


Рис. 8. Изменение глубины проплавления дна узкой разделки от частоты переменного магнитного поля

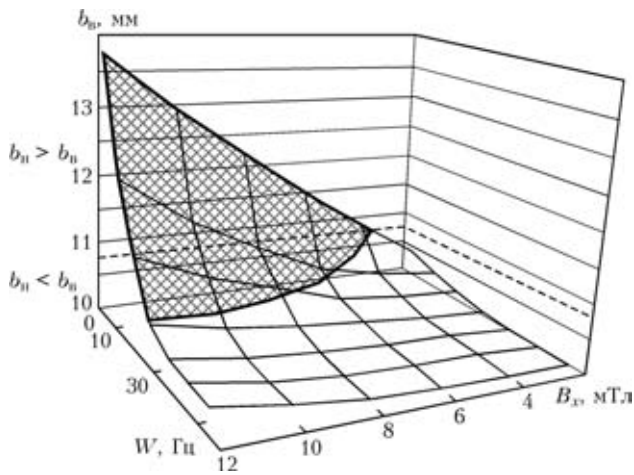


Рис. 9. Влияние индукции  $B_x$  и частоты  $W$  переменного магнитного поля на ширину валика в нижней части  $b_n$ , заштрихованная область —  $b_n > b_n$

Более глубокое проплавление боковых стенок разделки при повышении магнитной индукции связано с тем, что угол поворота сварочной дуги при этом возрастает [4], в результате большая часть анодного пятна перемещается к боковой стенке, где соответственно усиливается тепловложение и увеличивается глубина проплавления.

Уменьшение глубины проплавления боковых стенок разделки при повышении частоты магнитного поля связано с увеличением количества переходов дуги в единицу времени из одного

крайнего положения в другое. Поскольку время нарастания импульса тока намагничивания  $t_H$  (см. рис. 4) составляет 6 мс и при изменении частоты магнитного поля это значение постоянное (при использовании устройства управления ОИ-119), то в течение этого времени дуга находится в промежуточном положении и дно узкой разделки расплавляется. В связи с увеличением частоты магнитного поля при неизменной магнитной индукции глубина проплавления боковых стенок уменьшается (рис. 9). Чтобы оно происходило на одинаковой глубине при повышении частоты магнитного поля, следует сварочную дугу поворачивать на больший угол, а для этого необходимо увеличивать магнитную индукцию. Если  $W = 20$  Гц, то равномерное проплавление боковых стенок достигается при  $B_x = 12...13$  мТл.

### Выводы

1. Для формирования наплавляемого валика оптимальной формы при сварке в узкий зазор, а также с целью исключения образования несплавленных при наплавке валика высотой 5...6 мм в разделку шириной 8...10 мм значение магнитной индукции управляющего переменного магнитного поля в зоне дуги должно составлять 8...9 мТл.

2. Минимальное проплавление поверхности предыдущего слоя и равномерное по высоте проплавление боковых стенок узкой разделки происходит при частоте переменного магнитного поля 10 Гц.

1. Кацуёси Хори, Мицуаки Ханэда. Дуговая сварка в узкий зазор // Журн. Япон. свароч. об-ва. — 1999. — № 3. — С. 55–56.
2. Гринин В. С., Штрикман М. М. Высокопроизводительная автоматическая сварка в узкощелевую разделку // Свароч. пр-во. — 1982. — № 7. — С. 21–23.
3. Paton V. E., Zamkov V. N., Prilutsky V. P. Narrow-groove welding proves its worth on thick titanium // Welding J. — 1996. — № 5. — P. 37–41.
4. Гаген Ю. Г., Таран В. Сварка магнитоуправляемой дугой. — М.: Машиностроение, 1970. — 160 с.

The effectiveness of application of narrow-gap nonconsumable-electrode argon-arc welding of titanium alloys of ? 20 mm thickness is noted. It is shown that in order to provide a reliable fusion in the joints when using a transverse variable magnetic field the value of magnetic inductance in the arc zone should be equal to 8 Ц 9 mT. Minimum penetration of the side walls is achieved at the field frequency of 10 Hz.

Поступила в редакцию 23.02.2006,  
в окончательном варианте 21.03.2006