



СВАРКА В УЗКИЙ ЗАЗОР ВЫСОКОПРОЧНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ТОЛЩИНОЙ ДО 110 мм

С. В. АХОНИН, д-р техн. наук, В. Ю. БЕЛОУС, канд. техн. наук,
В. С. РОМАНЮК, В. В. СТЕСИН, С. И. ВЕЛИКИЙ, А. В. СЕМЕНЕНКО, А. К. ПОЛИЩУК, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработан способ дуговой сварки титановых сплавов большой толщины (20...110 мм) в узкую разделку, имеющий следующие преимущества: снижение требований к подготовке кромок и соответственно затрат на подготовительные операции, уменьшение угловых деформаций и остаточных сварочных напряжений в соединениях, экономный расход сварочной проволоки и электроэнергии при обеспечении высокого качества сварных соединений. Гарантированное сплавление боковых стенок разделки со сварным швом достигается благодаря управляющему поперечному переменному магнитному полю.

Ключевые слова: сварка ТИГ, титановые сплавы, присадочная проволока, большая толщина, узкий зазор, управляющее магнитное поле, сплавление кромок, структура, механические свойства

В последние годы наблюдается значительный рост объема применения титановых сплавов в различных отраслях промышленности. Помимо традиционного использования в аэрокосмической технике и кораблестроении, титановые сплавы стали широко применять в химическом машиностроении. Существует тенденция более широкого использования высокопрочных титановых сплавов, например ВТ6, ВТ20, ВТ23 ($\sigma_B = 835...1400$ МПа). Значительное количество сварных соединений толщиной 20...110 мм получено многослойной аргонодуговой сваркой в U-образную или V-образную разделку. Существенным недостатком этого способа сварки является большой объем наплавляемого металла, при этом стоимость используемой титановой проволоки значительно превышает стоимость титанового проката. Для соединения конструкций толщиной 20...110 мм в ряде случаев наиболее эффективной является технология аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом в щелевую разделку (узкий зазор), для успешной реализации которой необходимо обеспечить следующие условия: надежную защиту зоны сварки и вольфрамового электрода от окисления воздухом; качественное формирование металла шва и гарантированное оплавление вертикальных стенок щелевой разделки; обзор зоны сварки для контроля за процессом; контроль за положением вольфрамового электрода в центральной плоскости разделки в ходе сварки.

Сварку титана в щелевую разделку рекомендуется выполнять по двум схемам: с защитным соплом, которое опущено в зазор [1]; с защитным соплом, расположенным над поверхностью сва-

риваемых деталей [2]. При использовании второй схемы сварки в зазор помещают только один вольфрамовый электрод. Можно выполнять сварку в узкий зазор шириной 8...12 мм, что позволяет в 1,5...2,0 раза сократить расход дорогостоящего присадочного материала по сравнению со сваркой в узкий зазор по первой схеме, а также снизить сварочные деформации. Однако при использовании второй схемы возникает проблема защиты зоны сварки и наплавленного металла от поглощения кислорода и азота из воздуха. Исследования, проведенные в ИЭС им. Е. О. Патона, показали перспективность процесса сварки титана в узкий зазор по второй схеме. Была создана установка АД238 консольного типа для сварки листового титана толщиной до 100 мм и длиной до 2000 мм [2].

Основной задачей при выполнении сварки в узкий зазор является обеспечение надежного и равномерного сплавления вертикальных стенок щелевой разделки с наплавляемым валиком, а также валиков между собой. При сварке в узкий зазор вольфрамовым электродом без отклонения сварочной дуги значительная доля ее тепла расходуется на повторное проплавление предыдущего прохода. При этом могут возникать непровары вертикальных стенок разделки. Особенно часто непровары образуются в месте пересечения вертикальных стенок разделки с поверхностью предыдущего прохода, что связано с интенсивным теплоотводом на этом участке сварного соединения.

Для гарантированного проплавления боковых стенок применяют, как правило, поперечное перемещение сварочной дуги, которое может осуществляться как механически (поперечным перемещением или вращением вольфрамового электрода) [3], так и посредством наложения внешнего магнитного поля, в результате чего происходит

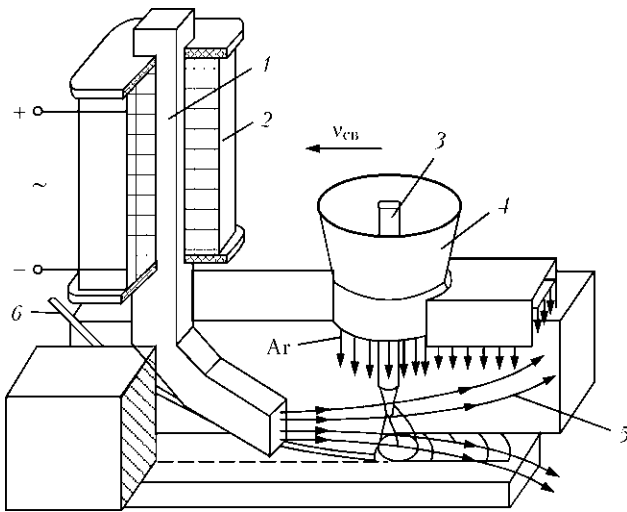


Рис. 1. Схема процесса сварки в узкий зазор с управляющим магнитным полем: 1 — сердечник электромагнита; 2 — катушка электромагнита; 3 — вольфрамовый электрод; 4 — защитное сопло; 5 — силовые линии управляющего магнитного поля; 6 — присадочная проволока

отклонение сварочной дуги [2] и смещение ее анодного пятна. Поскольку титан и сплавы на его основе являются немагнитными материалами, то наиболее эффективный способ обеспечения надежного и равномерного расплавления боковых стенок зазора — это электромагнитное управление отклонением сварочной дугой.

Для реализации управления сварочной дугой применен источник питания катушки электромагнита «БУМП-2» (ООО «Росток-СПАРКС»), формирующий импульсы трапецеидальной формы с амплитудой до 6 А. При сварке сердечник электромагнита выполняет функции магнитопровода и помещается в узкий зазор (рис. 1). При протекании тока через катушку электромагнита в зоне горения дуги создается магнитное поле, силовые линии которого в зоне дуги расположены преимущественно вдоль направления сварки. Такое магнитное поле является поперечным по отношению к дуге. Поочередное отклонение свароч-

ной дуги к боковым стенкам разделки и соответственно смещение анодного пятна дуги на боковые стенки осуществляется сменой полярности тока, протекающего через катушку электромагнита. Максимальная индукция управляющего магнитного поля в зоне дуги может составлять 8 мТл. При этом продольная составляющая индукции управляющего магнитного поля не превышает 20 %. Частоту реверсирования магнитного поля при использовании разработанной системы формирования управляющего магнитного поля «БУМП-2» можно регулировать в диапазоне от 1 до 80 Гц, магнитную индукцию — от 0 до 8 мТл.

Исследования особенностей формирования сварных швов титановых сплавов при сварке в узкий зазор с управляющим магнитным полем показали, что управление боковых стенок возрастает с увеличением поперечной составляющей индукции магнитного поля и уменьшением частоты его реверсирования. При частоте реверсирования управляющего магнитного поля более 20 Гц наибольшая глубина проплавления поверхности предыдущего слоя зафиксирована в центре шва. В сварных швах, выполненных на оптимальных режимах, непровары и несплавления полностью отсутствуют.

Электрическая дуга при сварке в узкий зазор горит в стесненных условиях, при этом, помимо вольфрамового электрода, в щелевой разделке размещены направляющая для присадочной проволоки и магнитопровод электромагнита, что затрудняет возможность оператору непосредственно контролировать процесс сварки. Для визуального наблюдения за процессом сварки и контроля состояния вольфрамового электрода и положения присадочной проволоки в разделке разработана малогабаритная видеокамера ВК-27, оснащенная насадкой прямого угла. Она предназначена для телевизионного наблюдения за процессом сварки ТИГ конструкций из титана и титановых сплавов на токе до 500 А. В состав видеокамеры входят светофильтр, объектив, матрица фотоприемника

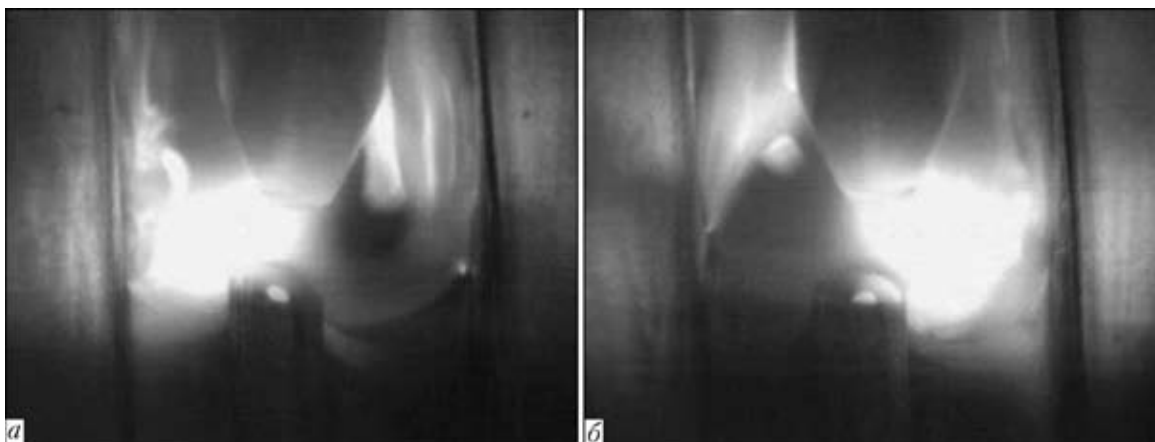


Рис. 2. Видеоизображение процесса аргодуговой сварки титана вольфрамовым электродом в узкий зазор с внешним управляющим магнитным полем при отклонении дуги к левой (а) и правой (б) стенкам разделки

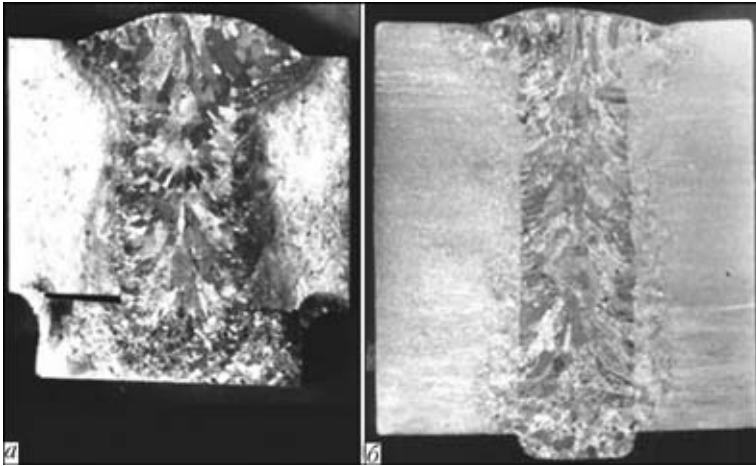


Рис. 3. Макрошлифы сварных соединений, полученных сваркой ТИГ в узкий зазор с управляющим магнитным полем на остающейся (а) и формирующей (б) подкладке

и микропроцессорный контроллер на базе цифрового сигнального процессора. Камера формирует выходной видеосигнал формата PAL. С помощью телевизионного наблюдения за процессом сварки в узкий зазор можно решить еще одну проблему — обеспечить контроль за положением вольфрамового электрода в центральной плоскости разделки в процессе сварки (см. рис. 2).

На основании результатов исследований отработаны две схемы сборки деталей под сварку в узкий зазор и подобраны соответствующие режимы. Первая предусматривает применение подкладки, которая приваривается с обратной стороны свариваемых деталей. Существенным недостатком такой схемы применительно к титановым сплавам является то, что приваренную подкладку, как правило, необходимо удалять, при этом на поверхности деталей остаются дефекты. Для предотвращения этого предложена вторая схема сборки и сварки с формирующей водоохлаждаемой подкладкой [4], которая служит кристаллизатором для валика первого прохода, защищает обратную сторону детали от окисления воздухом

Таблица 1. Содержание газов в сварных соединениях сплава ВТ23, мас. %

| Материал | [O] | [N] | [H] |
|----------------------------|------|-------|--------|
| Основной металл | 0,07 | 0,024 | 0,002 |
| Присадочная проволока СП15 | 0,06 | 0,016 | 0,0023 |
| Металл шва | 0,06 | 0,020 | 0,0022 |

Таблица 2. Механические свойства основного металла и металла сварных швов

| Объект исследования | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | ψ , % | $KCV_{2,2}$, Дж/см ² |
|------------------------------|------------------|----------------------|--------------|------------|----------------------------------|
| Основной металл – сплав ВТ23 | 1030 | 980 | 13,0 | 30,0 | 35 |
| Металл шва | 1010 | 978 | 4,0 | 3,9 | 21 |
| Сварное соединение | 960 | — | — | — | — |

и выполняет функции токоподвода. Макрошлифы сварных соединений, полученных по указанным схемам, представлены на рис. 3.

Результаты определения содержания газов в металле шва (табл. 1) показали, что оно не превышает содержание газов в основном металле и зависит от их содержания в присадочной проволоке. Это подтверждает высокое качество газовой защиты при сварке.

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что прочность сварных швов, выполненных на титановом сплаве ВТ6 аргонодуговой сваркой в узкий зазор с применением присадочной проволоки СПТ2, в состоянии после сварки по своим свойствам находятся на уровне 95 % прочности основного металла (табл. 2), что соответствует требованиям, предъявляемым к швам первой категории.

Исследования структуры швов, выполненных на двухфазном титановом сплаве ВТ23 с применением высоколегированной присадочной проволоки СП15, показали, что при отсутствии индукции без колебаний сварочной дуги фиксируется наличие грубоигльчатой структуры с длинными мартенситными иглами, которые встречаются как в центральной части шва, так и в периферийной. В периферийной части металла швов, выполненных с магнитной индукцией 6 мТл, мартенситная структура более грубая. Однако мартенситные иглы в данном случае короче, чем в металле швов, выполненных без колебаний сварочной дуги.

В металле сварных швов, выполненных с магнитной индукцией более 6 мТл, формируется однородная структура, при этом как в центральной, так и в периферийной зоне швов грубые мартенситные иглы отсутствуют. Увеличение частоты реверсирования свыше 20 Гц практически не влияет на длину мартенситных игл.

Анализ микроструктуры сварных швов титанового сплава ВТ23 с присадочной проволокой СП15, выполненных сваркой в узкий зазор, показал, что средняя длина мартенситных игл без магнитного поля составляет 0,10...0,05 мм. При сварке с частотой реверсирования магнитного поля 10 Гц и магнитной индукцией 6 и 12 мТл средняя длина мартенситных игл уменьшается соответственно до 0,06...0,08 и 0,04...0,05 мм. При магнитной индукции 8 мТл и увеличении частоты реверсирования магнитного поля от 2,5 до 20,0 Гц средняя длина мартенситных игл уменьшается от 0,10...0,15 до 0,03...0,04 мм. Дальнейшее увеличение частоты реверсирования магнитного поля заметно не

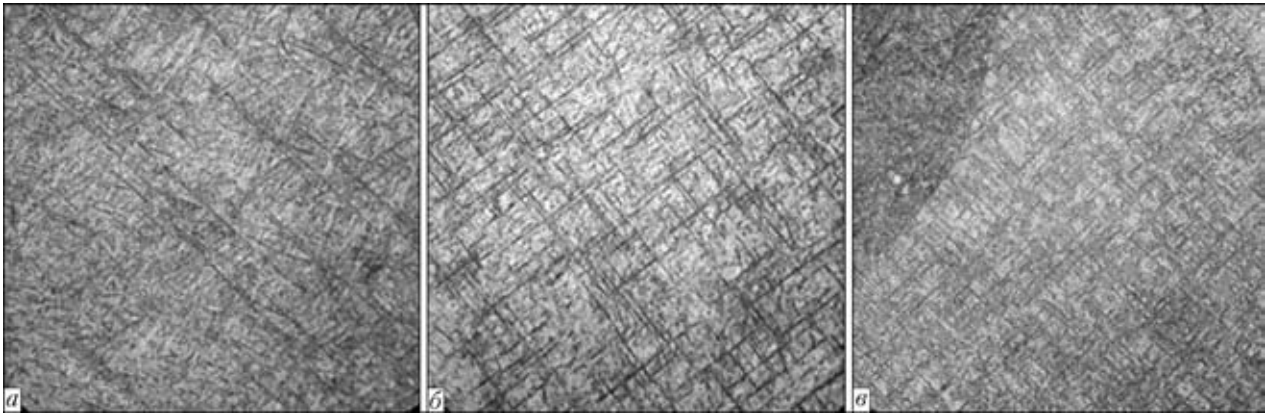


Рис. 4. Микроструктуры ($\times 400$) металла сварных швов, выполненных без магнитного поля (а) и с управляющим магнитным полем с индукцией 6 (б) и 8 мТл (в)

сказывается на длине мартенситных игл в металле швов.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что применение магнитного управления сварочной дугой при сварке позволяет почти в 4 раза уменьшить среднюю длину мартенситных игл и получить более однородную и мелкоигольчатую структуру металла шва (рис. 4). По мнению авторов, улучшение вторичной структуры металла шва двухфазных титановых сплавов связано с возникновением поперечных колебаний сварочной ванны. Поперечные колебания расплава в хвостовой части сварочной ванны фиксируются на видеозаписи процесса сварки в узкий зазор, а также проявляются в изменении чешуйчатости поверхности шва: с увеличением частоты реверсирования управляющего магнитного поля расстояние между чешуйками уменьшается. В результате поперечных колебаний сварочной ванны происходит периодическое подплавление металла на фронте кристаллизации, а в сварных швах двухфазных титановых сплавов формируется мелкодисперсная структура, в которой средний размер мартенситных игл уменьшается от 160 до 40 мкм.

Решение перечисленных выше задач позволило разработать сварочную установку для полу-

чения соединений высокопрочных титановых сплавов толщиной до 110 мм сваркой ТИГ в узкий зазор с магнитным управлением дугой (рис. 5). На установке сварка выполняется по второй схеме. Для решения проблемы защиты зоны сварки разработана сварочная горелка с цилиндрическим защитным соплом, расположенным над поверхностью свариваемых деталей (рис. 6), внутренняя поверхность которого имеет образующую по форме, близкую к кривой Витошинского [5]. Применение такой сварочной горелки позволило гарантировать надежную защиту зоны сварки при получении сварных соединений титана и сплавов на его основе толщиной до 110 мм.

Сварочная установка состоит из следующих основных узлов: неподвижного портала для расположения сварочной головки над местом сварки; тележки с механизмом перемещения сварочной головки вдоль шва; сварочной горелки с защитным сапогом; механизма вертикального перемещения сварочной головки с системой автоматической регулировки напряжения дуги; механизма поперечного перемещения сварочной головки; механизма подачи присадочной проволоки; системы магнитного управления дугой; системы телевизионного наблюдения за процессом сварки; стола для сварочных об-

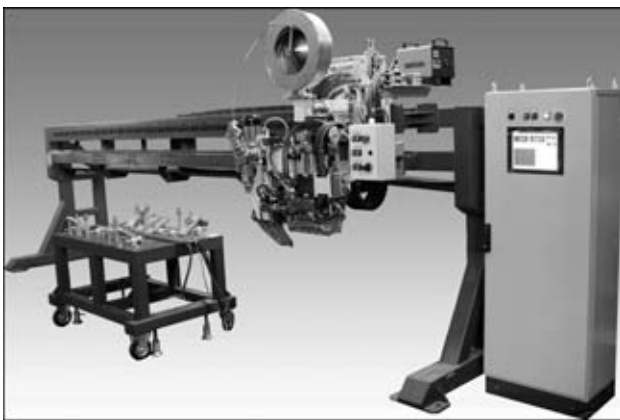


Рис. 5. Установка портального типа для сварки в узкий зазор соединений титана и сплавов на его основе толщиной 20...110 мм

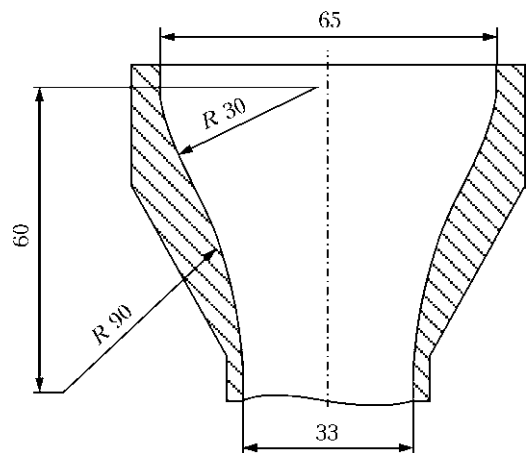


Рис. 6. Схема защитного сопла для сварки в узкий зазор титана и сплавов на его основе



разцов; источника питания ВДУ-511 с возбудителем дуги ВСД-02; шкафа управления с сенсорным дисплеем; пульта местного управления.

Система управления установкой предназначена для осуществления технологического процесса аргонодуговой сварки титановых сплавов и обеспечения функционирования оборудования на следующих режимах: «Наладка» — для проверки работы всех механизмов установки и выполнения установочных перемещений перед сваркой; «Автомат» — для автоматического управления технологическим процессом сварки по заданной программе. С помощью системы управления осуществляются как визуальное наблюдение за процессом сварки, так и регистрация его параметров — напряжения, тока дуги, скорости сварки, скорости подачи проволоки, частоты и индукции магнитного поля.

Сварочная установка выполняет многопроходную сварку в автоматическом режиме соединений технического титана и сплавов на его основе толщиной 20...110 мм и протяженностью до 4000 мм в узкий зазор прямолинейными швами, толщина наплавляемого слоя за один проход составляет 5...7 мм.

Разработанные технология сварки и установка обеспечивают получение сварных соединений высокого качества.

Выводы

1. На основании проведенных исследований разработана технология сварки высокопрочных титановых сплавов в узкий зазор с внешним уп-

равляющим магнитным полем, обеспечивающая высокое качество сварных соединений и их механические свойства на уровне не менее 90 % показателей основного металла.

2. При сварке в узкий зазор с управляющим магнитным полем в металле швов, выполненных на сварных двухфазных титановых сплавах, формируется мелкодисперсная структура, причем средний размер мартенситных игл уменьшается в 4...5 раз (от 160 до 40 мкм) по сравнению с металлом швов, выполненных без управляющего магнитного поля.

3. Разработана установка портального типа для многопроходной сварки соединений титана и высокопрочных сплавов на его основе толщиной 20...110 мм и протяженностью до 4000 мм в автоматическом режиме в узкий зазор прямолинейными швами, которая обеспечивает высокое качество полученных сварных соединений.

1. Михайлов В. И., Сахаров И. Ю. Сварка конструкций из титановых сплавов больших толщин (проблемы технологии) // Тi-2006 в СНГ: Сб. тр. междунар. конф., Россия, г. Суздаль, 21–24 мая 2006 г. — Киев: Наук. думка, 2006. — С. 109–111.
2. 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.
3. Гринин В. С., Штрикман М. М. Высокопроизводительная автоматическая сварка в узкощелевую разделку // Свароч. пр-во. — 1982. — № 7. — С. 21–23.
4. Белоус В. Ю. Сварка толстолистового титана с применением формирующей подкладки // Автомат. сварка. — 2009. — № 10. — С. 40–42.
5. Ардентов В. В., Федоренко Г. А. О влиянии конструкций проточной части горелок на характеристики газовой защиты // Свароч. пр-во. — 1973. — № 10. — С. 24–26.

A method of narrow-gap arc welding of thick titanium alloys (20...11 mm) was developed, which has such advantages as simplification of edge preparation and reduction of the cost of preparatory operations, lowering of angular deformations and residual welding stresses, reduction of welding wire and power consumption, while guaranteeing the high quality of welded joints, irrespective of the thickness of elements being joined. Guaranteed fusion of side walls of the groove with the weld is achieved due to the controlling transverse variable magnetic field.

Поступила в редакцию 22.03.2010