

ДУГОВАЯ СВАРКА В УЗКИЙ ЗАЗОР ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ (Обзор)

В. Ю. БЕЛОУС, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проанализирован опыт практического применения дуговой сварки в узкий зазор конструкций из титана и титановых сплавов. Показаны преимущества указанного способа сварки. Отмечена перспективность применения магнитных способов управления сварочной дугой.

Ключевые слова: аргодуговая сварка, дуговая сварка в узкий зазор, узкощелевая разделка, титан, титановые сплавы

Высокая химическая активность титана по отношению к атмосферным газам вызывает значительные трудности при его горячей обработке и прежде всего при сварке. Заметное поглощение кислорода титаном начинается уже при температуре 500, азота — при 600 °С, взаимодействие титана с влагой и растворение в нем водорода происходит даже при более низких температурах [1, 2]. В свою очередь по мере увеличения содержания этих примесей в титане улучшаются его прочностные характеристики, снижается пластичность. Известно, что каждые 0,05 мас. % кислорода в титане увеличивают его временное сопротивление примерно на 60 МПа. С возрастанием количества кислорода в титане снижается его ударная вязкость, особенно при 0,1...0,3 мас. %. Азот в еще большей степени чем кислород упрочняет титан и ухудшает его пластические свойства. Водород резко снижает ударную вязкость титана, способствует его охрупчиванию, вызывает самопроизвольное разрушение конструкций [3], является одной из основных причин возникновения пор в швах.

Отрицательное влияние примесей газов на свойства сварных соединений титановых сплавов проявляется более резко, чем на свойства самих сплавов. Кроме общего снижения пластичности металла швов и зоны термического влияния (ЗТВ), примеси кислорода и азота способствуют развитию структурной и химической неоднородности, что является дополнительной причиной резкого падения работоспособности сварных соединений титановых сплавов [4].

Таким образом, при сварке изделий из титановых сплавов прежде всего следует обеспечить надежную защиту не только сварочной ванны, но и остывающего металла шва и участков ЗТВ, которые в процессе сварки нагреваются до температуры свыше 350...450 °С, чтобы содержание примесей газов в металле шва и в металле ЗТВ соответствовало их количеству в основном металле.

Необходимость создания надежной защиты зоны сварки от контакта с воздухом (с учетом характерных для титана низкой теплопроводностью и относительно высокой теплоемкостью) во многом

определяет параметры режимов сварки титановых сплавов, в частности ограничивает сварочный ток и сужает интервал приемлемых скоростей сварки [5]. На выбор режимов сварки существенное влияние оказывает и особенность полиморфного превращения в титане.

Как следует из работы [2], полиморфное превращение в титане носит мартенситный характер и при охлаждении из β -области микроструктура металла шва и околошовных участков ЗТВ большинства титановых сплавов представляет собой мартенситоподобные выделения в виде игл или пластин. В зависимости от скорости охлаждения, т. е. от режимов сварки, степени легирования сплава форма и размеры этих выделений могут изменяться от крупнопластинчатой α' -фазы до тонкоиглообразчатой α' -фазы. Обычно большая высокая работоспособность присуща сварным соединениям, имеющим тонкоиглообразчатую структуру металла шва и околошовного участка ЗТВ.

Размер зерна также оказывает существенное влияние на механические свойства сварных соединений, однако регулировать его в металле ЗТВ путем подбора соответствующих режимов сварки не представляется возможным [6]. Можно лишь уменьшить ширину ЗТВ и, следовательно, протяженность участка металла с крупным зерном. Поэтому при сварке титановых сплавов по мере увеличения толщины металла обеспечивать надежность защиты зоны сварки и определенное структурное состояние металла шва и ЗТВ становится значительно сложнее.

В настоящее время для соединения толстого металла наиболее перспективной является дуговая многослойная сварка в узкий зазор [7]. По сравнению со сваркой в обычную разделку этот способ обеспечивает уменьшение количества наплавленного металла, снижение трудоемкости сварочных работ и тепловложения в свариваемый металл. Для сварки титановых сплавов это имеет особое значение, поскольку стоимость титановой проволоки в несколько раз превышает стоимость полуфабрикатов.

Сварка титана и титановых сплавов в узкий зазор может осуществляться как неплавящимся, так и плавящимся электродом. В работе [8] описан опыт применения механизированной двусторонней сварки титановых сплавов в узкий зазор плавящимся электродом. Толщина металла стыковых

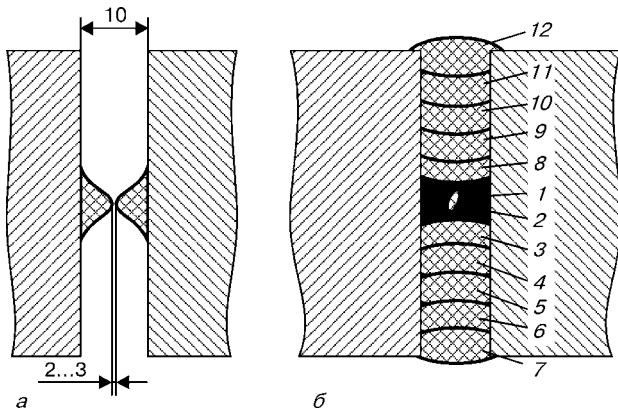


Рис. 1. Схема соединения с наплавками, собранное под сварку, (а) и порядок выполнения проходов (б), обозначенный цифрами соединений из сплава ВТ5 составляла 36... 130 мм. В связи с высоким электросопротивлением титана вылет плавящегося электрода не превышал 35 мм при использовании источника питания ПСГ-500 с жесткой характеристикой и 60 мм — модернизированного источника питания. Поэтому сварку соединений толщиной более 60 мм выполняли с двух сторон. Предварительно посредством ручной аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом с присадочной проволокой из сплава ВТ1-00св на середину кромки наплавляли валики. Подготовленные таким образом детали собирали с зазором 2... 3 мм (рис. 1, а), что позволило не производить дополнительную механическую обработку торцов свариваемых листов для создания притупления. Корневой проход также выполняли ручной аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом, а заполняющие проходы — механизированной сваркой плавящимся электродом в аргоне. Для предотвращения возможных замыканий токоподводящего наконечника с кромками изделия на тыльной стороне газозащитной приставки были установлены специальные фиксаторы. В качестве присадочного материала использовали проволоку ВТ1-00св диаметром 1,6 или 2,0 мм. Несмотря на то что в этом случае временное сопротивление металла шва (400... 430 МПа) меньше, чем основного металла (750... 850 МПа), равнопрочность сварного соединения достигалась за счет эффекта контактного упрочнения соединений с мягкой прослойкой [9].

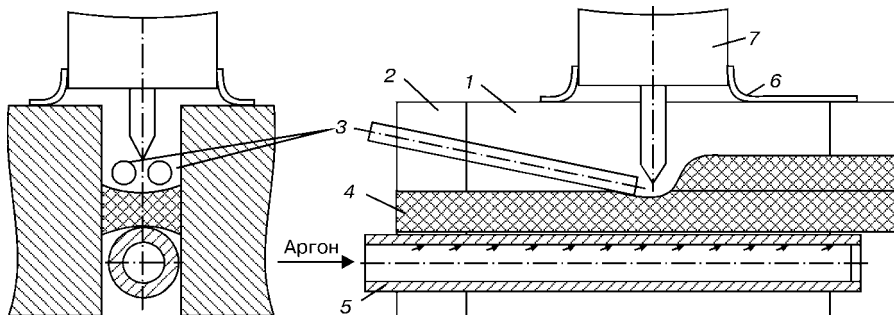


Рис. 2. Схема ручной аргонодуговой сварки по щелевому зазору неплавящимся электродом: 1 — свариваемая деталь; 2 — выводные планки; 3 — присадка; 4 — наплавленный металл; 5 — приспособление для наддува; 6 — щиток-отражатель; 7 — сопло горелки

Свойства сварных соединений в зависимости от ширины шва и толщины основного металла

$B_{ш}$	$B_{ш}/\delta_{о.м}$	σ_T , МПа	σ_B , МПа	Место разрушения
20,6	0,70	413	551	Шов
11,9	0,39	614	765	»
7,9	0,30	689	930	Основной металл

Примечания. 1. Здесь $B_{ш}$ — ширина шва; $\delta_{о.м}$ — толщина основного металла; 2. σ_T основного металла составляет 803, присадочного — 422 МПа, а σ_B основного металла — 903, присадочного — 516 МПа.

Следует отметить, что по сравнению с ручной аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом, сварка в узкий зазор позволила значительно сократить количество проходов (от 60... 70 до 16... 18 при сварке плит толщиной 100 мм). Основным недостатком этого способа сварки заключается в большом разбрызгивании присадочного металла, что ухудшает газовую защиту зоны сварки и может вызвать нарушение процесса. Кроме того, возможны замыкания между токоподводящим наконечником и кромками изделия.

Возможность реализации эффекта контактного упрочнения в соединениях титановых сплавов, сваренных в узкий зазор, была использована в работе [10]. Цель исследований состояла в необходимости снижения стоимости сварных соединений. Для этого предусматривалось применение присадочной проволоки, менее легированной и менее прочной, чем основной металл, упрощение подготовки кромок под сварку и сокращение геометрических размеров сварного шва и ЗТВ. В частности, были сварены стыковые соединения толщиной 25 мм из сплава марки Ti-6Al-4V. В качестве присадочного материала использовали проволоку диаметром 1,6 мм из технического чистого титана. Сварку выполняли неплавящимся электродом в нижнем положении. Применяли остающуюся подкладку толщиной 6,5 мм из того же сплава. Была опробована сварка стыковых образцов с разной шириной зазора: 19,0, 11,0 и 6,5 мм. Сварочный ток составлял 300... 340 А, скорость сварки — 2,5... 3,2 мм/с, напряжение на дуге — 14,5... 18 В.

Результаты исследований показали, что с уменьшением ширины разделки прочность сварного соединения возрастает (таблица). Это связано не только с увеличением доли основного металла в металле шва, но и с развитием сложного напряженного состояния в зоне пластической деформации, способствующего контактному упрочнению.

Ручную аргонодуговую сварку в узкий зазор вольфрамовым электродом применяют для изготовления элементов химического оборудования (фланцев, колец, крышек высокого давления), где необходимо вы-

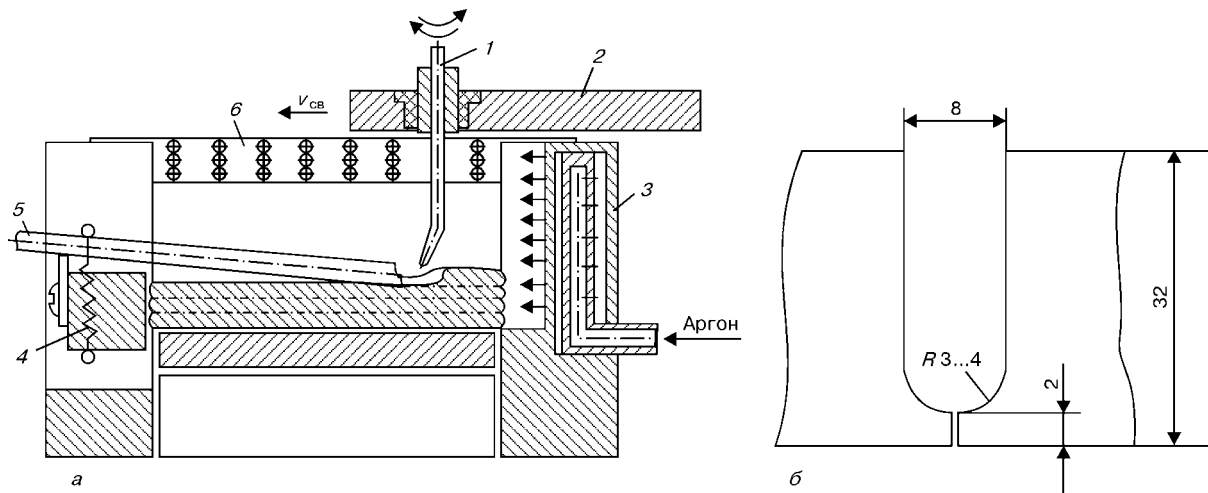


Рис. 3. Схема процесса аргодуговой сварки в узкий зазор вращающимся изогнутым вольфрамовым электродом (а): 1 — вольфрамовый электрод; 2 — подвижная заслонка; 3 — распылитель; 4 — прижимное приспособление; 5 — пруток; 6 — защитные накладки; б — схема разделки кромок

полнять короткие швы на металле большой толщины [11]. При этом используют схему подготовки кромок, представленную на рис. 1, а. Сварку осуществляют в следующей последовательности. Первоначально (с двух сторон) сваривают созданное предварительной наплавкой притупление, а затем заполняют зазор последовательным наложением друг на друга валиков (см. рис. 1, б). Сварку осуществляют в аргоне вольфрамовым электродом марки ВЛ с присадочной проволокой ВТ1-00св. Сварочный ток составляет 380... 400 А, напряжение на дуге — 10... 12 В.

Следует отметить некоторые особенности техники сварки (рис. 2). Ось электрода должна находиться в вертикальной плоскости перпендикулярно к оси шва. Поперечных колебаний электродом не производят. Присадочные проволоки подаются в зону дуги под углом 5... 10° без продольных перемещений. В случае сварки в относительно узкой и глубокой щели при соблюдении указанных условий надежная защита наплавляемого металла обеспечивается без применения насадок; используют лишь щиток-отражатель, надеваемый на сопло горелки.

При сварке внешних слоев применяют обычные насадки с дополнительной подачей аргона. Сварные соединения, выполненные по такой технологии, имеют достаточно высокие значения механических и коррозионных свойств. Согласно данным работы [12] эту технологию успешно применяли для сварки корпуса ацетилятора, представляющего собой сосуд диаметром 3000 мм из листового сплава АТЗ.

Основной проблемой, возникающей при сварке в узкий зазор, является обеспечение надежности сплавления металла шва со стенками разделки. Для предотвращения возможных дефектов предложен ряд технологических приемов, в частности, сварка на повышенных токах, выполнение швов с раскладкой валиков, принудительное колебание электрода и дуги [13].

Чтобы обеспечить надежное сплавление металла шва с вертикальными стенками зазора, при автоматической аргодуговой сварке титана исполь-

зовали вольфрамовый электрод диаметром 4 мм с изогнутым на 20... 25° рабочим участком длиной 8... 12 мм [14]. При повороте электрода вокруг своей оси сварочная дуга периодически направляется то на одну, то на другую стенку зазора (рис. 3, а), что обеспечивает равномерный прогрев и плавление. Регулируя амплитуду поворота (в пределах 70... 160°) и частоту угловых колебаний, обеспечивали стабильное проплавление кромок на заданную глубину. О качественном сплавлении наплавленного металла с кромками свидетельствует характерное формирование поверхности каждого слоя в виде вогнутого мениска. Как показали результаты исследований, с изменением амплитуды поворота от 70 до 160° на титановом сплаве ВТ6 глубина проплавления увеличилась от 0,2... 0,3 до 1,2... 1,5 мм.

Защиту металла от окисления обеспечивали путем подачи аргона вдоль щели через распылитель, установленный в начале шва или перемещающийся в щели за электродом. Чтобы не допустить попадания воздуха сверху и защитить вольфрам, аргон дополнительно подавали через водоохлаждаемые накладки, расположенные над щелью.

Горелка рассчитана на сварку титана толщиной до 100 мм. Присадочную проволоку подают в головную часть ванны. При сварке коротких швов прутки диаметром 3... 5 мм предварительно укладывают в разделку. Сварку выполняют в U-образную разделку шириной 7... 9 мм (рис. 3, б).

При сварочном токе 230 А и скорости сварки 5 м/ч высота наплавленного валика за один проход составляет 2... 3 мм. Конструкция сварочной головки при таком способе сварки позволяет вести процесс в различных пространственных положениях.

Вследствие небольшого объема сварочной ванны жидкий металл надежно удерживается силами поверхностного натяжения при движении сварочной головки как сверху вниз, так и снизу вверх. Вертикальные швы свариваются на тех же режимах, что и швы в нижнем положении. Однако при сварке по этой схеме слабым звеном является изогнутый вольфрамовый электрод, поскольку его ра-

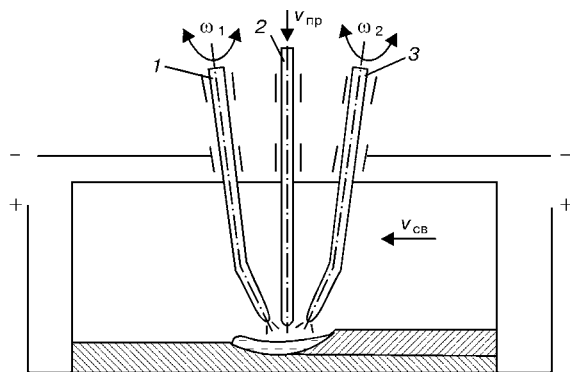


Рис. 4. Технологическая схема процесса сварки неплавящимся электродом: 1, 3 — изогнутые вольфрамовые электроды; 2 — присадочная проволока; ω_1, ω_2 — угловые скорости вращения соответственно переднего и заднего вольфрамовых электродов; $v_{пр}$ — скорость подачи присадочной проволоки

бочий участок постепенно разрушается, а многократная заточка электрода с изогнутым концом невозможна.

В работе [15] идея об использовании вольфрамового электрода с изогнутой рабочей частью реализована в двухэлектродной сварочной головке. Сварку (рис. 4) осуществляют одновременно двумя загнутыми вольфрамовыми электродами, которые вращаются вокруг собственных осей с угловыми скоростями ω_1 и ω_2 . Оси электродов и присадочной проволоки расположены в одной плоскости, совпадающей с осевой плоскостью щелевой разделки стыка. За счет вращательных движений электродов и их загнутых рабочих участков обе дуги совершают поперечные колебания. Присадочная проволока в щелевую разделку подается между двумя электродами перпендикулярно к поверхности шва. Схема управления головки позволяет автоматически изменять первоначально установленные значения тока дуги соответственно на переднем и заднем электродах в момент реверса продольного перемещения головки. Наиболее устойчивый процесс сварки и стабильное формирование шва были получены в том случае, когда сварочный ток на переднем электроде равнялся 100, а на заднем — 200 А. Проплавление стенок зазора и глубина проплавления металла предыдущего слоя были примерно одинаковыми и достигали 0,3... 0,6 мм. Несмотря на очевидные достоинства предложенная схема двухдуговой сварки имеет тот же недостаток, что и однодуговая вольфрамовым электродом с изогнутой рабочей частью. Поэтому для управляемого перемещения сварочной дуги в щелевом зазоре наиболее перспективным следует считать использование переменного магнитного поля.

Способ сварки в узкий зазор вольфрамовым электродом магнитоуправляемой дугой применительно к титановым сплавам рассмотрен в работах [16, 17]. Сварку плит толщиной 110 мм из сплавов марок ВТ1-00 и АТЗ осуществляли по схеме, приведенной на рис. 5, вольфрамовым электродом диаметром 5 мм с использованием присадочной проволоки диаметром 4 мм из сплава ВТ1-00св. Скорость сварки составляла 8 м/ч, сварочный ток — 420 А, напряжение на дуге — 13 В. Для создания управляющего магнитного поля использо-

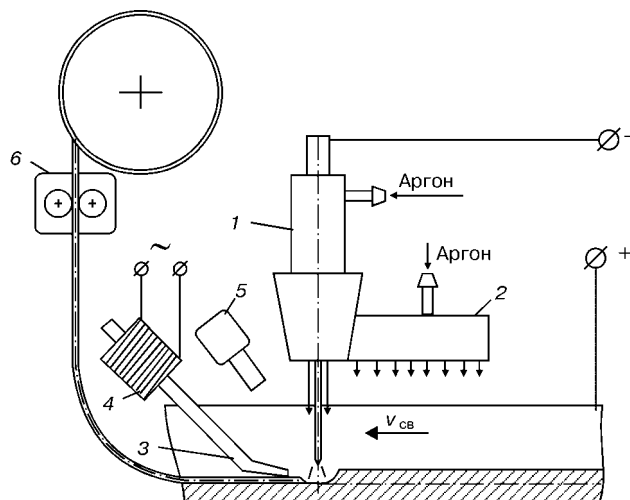


Рис. 5. Схема автоматической сварки в узкий зазор вольфрамовым электродом с магнитным управлением дугой: 1 — сварочная горелка; 2 — защитное приспособление; 3 — магнитопровод; 4 — электромагнит; 5 — телекамера; 6 — механизм подачи проволоки

вали специальное устройство (ОИ-119), позволяющее изменять частоту переменного магнитного поля в пределах 1... 80 Гц и уровень магнитной индукции.

В ходе экспериментов оказалось, что наложение на дугу переменного магнитного поля приводит к снижению эффективности газовой защиты зоны сварки и, как следствие, к ухудшению качества сварных соединений. При увеличении толщины свариваемого металла до 100 мм нестабильность газового потока настолько велика, что сварка становится невозможной. Для устранения этого явления была создана специальная сварочная горелка, обеспечивающая стабильность газового потока в зазоре при сварке металла толщиной до 110 мм. При этом отмечается однородность структуры металла швов и высокий уровень механических свойств сварных соединений.

Автоматическую аргонодуговую сварку титановых сплавов в узкий зазор выполняли с применением плавящегося электрода на плитах из сплава ВТ6ч толщиной 26... 135 мм [18]. В зависимости от их толщины осуществляли одно- или двустороннюю щелевую разделку кромок шириной 9,5... 10,0 мм, с притуплением 5 мм при односторонней сварке и притуплением 10 мм при двусторонней (скорость сварки 15... 22 м/ч; сварочная проволока диаметром 3 мм) с введением токоподвода в щелевой зазор без раскладки валиков по его ширине. После сварки примерно 10 м шва необходимо прочищать подающий канал от брызг и частиц налипшего металла. Защиту зоны сварки от воздуха обеспечивали три камеры: передняя (для защиты нагреваемых дугой кромок), средняя (для защиты зоны дуги и сварочной ванны) и задняя (для защиты остывающего шва на длине до 350 мм).

Плиты толщиной до 26 мм сваривали в один проход на токе 650... 720 А; для плит толщиной более 26 мм применяли многопроходную сварку на токе 450... 480 А. Скорость подачи присадочной проволоки в этом случае составляла 420... 470 м/ч

при однопроходной сварке и 220...230 м/ч при многопроходной. При оптимальном режиме обеспечивается наплавка валика толщиной около 19 мм при ширине разделки 10 мм. Несмотря на высокую производительность процесса сварки этот способ имеет серьезный недостаток — сильное разбрызгивание присадочного металла, что может вызвать нарушение процесса, короткое замыкание между стенками разделки и токоподводящим мундштуком, ухудшение газовой защиты зоны сварки.

В работе [19] сообщается о технологии сварки в узкий зазор неплавящимся вольфрамовым электродом, используемой при изготовлении таких ответственных конструкций, как котлы электростанций, аппараты глубоководного погружения и др. Сварку выполняли в U-образную разделку с углом раскрытия кромок 15°.

Для обеспечения надежной защиты сварочной ванны, присадочной проволоки и остывающего шва применена тройная газовая защита. В сварочную горелку независимо друг от друга подается три потока аргона: для защиты электрода, присадочной проволоки и остывающего металла шва. Особенность конструкции сварочной головки состоит в том, что в разделку помещается защитное сопло и цанга с вольфрамовым электродом (диаметр электрода 3 мм, вылет 20 мм), а над поверхностью изделия располагается дополнительное защитное приспособление, обдувающее аргоном поверхность изделия.

Как утверждают авторы работы [19], эта технология позволяет сваривать с двух сторон детали толщиной до 400 мм. Хотя не сообщается об опыте сварки титана или титановых сплавов, но считается возможным применение этого способа сварки для таких материалов, как высоколегированные сплавы, инконель, титановые сплавы.

Таким образом, дуговая сварка в узкий зазор считается эффективным процессом изготовления титановых конструкций из элементов средней и большой толщины, имеет самую высокую производительность. Однако наибольшее распространение получил способ сварки неплавящимся вольфрамовым электродом, имеющий относительно низкую производительность, но высокую надежность. Для получения бездефектных сварных соединений необходимо управлять процессами расплавления кромок и перемещения дуги в зазоре. Самым эффективным методом управления сварочной дугой является магнитное поле. Поэтому наиболее перспективным способом соединения титана

и сплавов на его основе следует считать автоматическую сварку неплавящимся электродом магнитоуправляемой дугой в сочетании с системой телевизионного контроля.

1. Цвиккер У. Титан и его сплавы. — М.: Металлургия, 1979. — 512 с.
2. Титан и его сплавы / А. С. Мороз, Б. Б. Чечулин, И. В. Долин и др. — Л.: Судпромгиз, 1960. — 516 с.
3. Гусева Е. А., Мордвинцев Л. А. Холодные трещины в сварных соединениях титановых сплавов. — М.: Металлургия, 1991. — 47 с.
4. Особенности газонасыщения титановых сплавов, легированных α - и β -стабилизаторами / Л. Ф. Сокирянский, Л. В. Губанова, В. В. Латаш и др. // Физика металлов и металловедение. — 1969. — 28. — С. 847-852.
5. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, В. Е. Блащук и др. — Киев: Наук. думка, 1986. — 240 с.
6. Шоршоров М. Х. Металловедение сварки стали и сплавов титана. — М.: Наука, 1965. — 336 с.
7. Malin V. Monograph on narrow-gap welding technology // WRC Bulletin. — 1987. — 323 p.
8. Полуавтоматическая сварка стыковых соединений титановых сплавов больших толщин без разделки кромок / В. Л. Руссо, Б. В. Кудояров, А. А. Николаев и др. // Свароч. пр-во. — 1971. — № 10. — С. 20-22.
9. Бакии О. А., Шрон Р. З. Прочность при статическом растяжении сварных соединений с мягкой прослойкой // Там же. — 1962. — № 5. — С. 9-15.
10. Wells M. E. Strengthening mechanisms in undermatched titanium welds // Titanium 92: science and technology: the minerals, metals, materials society: Proc. symp. 7th world titanium conf. (San Diego, June 29-July 2, 1992). — San Diego, 1992. — P. 1787-1794.
11. Беседный В. А., Шеленков Г. М. Сварка титана больших толщин по целевому зазору // Хим. и нефт. машиностроение. — 1970. — № 2. — С. 27.
12. Шеленков Г. М., Блащук В. Е. Применение сварки по целевому зазору при изготовлении химической аппаратуры из сплава АТЗ // Автомат. сварка. — 1974. — № 9. — С. 50-53.
13. Кацусеи Х., Мицуаки Х. Дуговая сварка титана в узкий зазор // Журн. Яп. свароч. о-ва. — 1999. — № 3. — С. 41-62.
14. Штрикман М. М., Гринин В. С. Автоматическая сварка в узкощелевую разделку высокопрочных сталей и титановых сплавов // Свароч. пр-во. — 1971. — № 1. — С. 16-19.
15. Гринин В. С., Штрикман М. М. Высокопроизводительная автоматическая сварка в узкощелевую разделку // Там же. — 1982. — № 7. — С. 21-23.
16. Прилуцкий В. П., Замков В. Н., Латченко С. В. Технологические и конструктивные особенности сварки титана в узкий зазор // Автомат. сварка. — 1989. — № 3. — С. 71-73.
17. Paton V. E., Zamkov V. N., Prilutsky V. P. Narrow-groove welding proves its worth on thick titanium // Welding J. — 1996. — № 5. — С. 37-41.
18. Штрикман М. М., Бородин Ю. М., Ермаков Л. К. Автоматическая аргонодуговая сварка толстостенных узлов плавящимся электродом по целевому зазору // Сварка цветных металлов. — Киев: Наук. думка, 1989. — С. 31-48.
19. Matsui S., Nakayama S., Sakurai T. Application of narrow gap GTA welding to various products. — Osaka: JWS, 1988. — P. 127-134.

Experience of practical application of narrow gap welding of structures of titanium and its alloys has been analyzed. The advantages of the above-mentioned method of welding are shown. Prospects of application of magnetic methods of welding arc control are outlined.

Поступила в редакцию 09.04.2002,
в окончательном варианте 14.05.2002