



СВАРКА ТИТАНА И ЕГО СПЛАВОВ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ (Обзор)

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

Рассмотрены особенности различных способов сварки неплавящимся электродом титана и его сплавов в инертных газах. Даны рекомендации по применению различных способов сварки, отмечены их преимущества и недостатки.

Ключевые слова: дуговая сварка, неплавящийся электрод, титановые сплавы, защитный газ, сварка погруженной дугой, сварка в узкий зазор, сварка сквозным проплавлением, плазменная сварка, микроплазменная сварка, технология, толщина металла, дефекты, контроль качества

Титан и его сплавы благодаря высокой удельной прочности и коррозионной стойкости, а также жаропрочности в определенном диапазоне температур широко используются в качестве конструкционных материалов в современном машиностроении. При этом дуговая сварка является ведущим технологическим процессом для получения неразъемных соединений. Главные трудности, возникающие при сварке титана, связаны с его химической активностью при высоких температурах (особенно в расплавленном состоянии) по отношению к составляющим воздуха. В этом случае обязательным условием получения качественного соединения является надежная защита от контактов с газами атмосферы не только зоны соединения, но и его остывающих участков (вплоть до температуры 300...400 °С). При сварке плавлением необходимо обеспечить также надежную защиту корня шва, если даже металл нагрелся выше указанной температуры, но еще не расплавился [1–4].

Во всем мире разработано и изготавливается в промышленных условиях значительное количество деформируемых титановых сплавов различного назначения. В зависимости от характера воздействия на титан разных легирующих элементов его промышленные сплавы, исходя из типа структуры, подразделяются на следующие группы [2, 3, 5, 6]:

α- и псевдо-α-сплавы (на основе α-фазы с 2...7 % β-фазы в равновесном состоянии). Они технологичны (из них изготавливают все типы полуфабрикатов), отличаются удовлетворительной пластичностью, свариваемостью и высокой коррозионной стойкостью в агрессивных средах. Сварка плавлением сплавов этого класса возможна в широком диапазоне параметров режима.

Сварные конструкции из этих сплавов подвергают неполному отжигу при температуре ниже 700 °С;

двухфазные α + β- и псевдо-β-сплавы (структура на основе β-фазы с небольшим количеством α-фазы). После отжига они приобретают удовлетворительные свойства. Однако широкому применению в сварных конструкциях таких высокопрочных сплавов препятствует недостаточная пластичность соединений в термически упрочненном состоянии. Для получения сварных соединений из сплавов этого класса рекомендуется однопроходная сварка без разделки кромок. В зависимости от условий эксплуатации сварные соединения подвергают отжигу или упрочняющей термической обработке — закалке и старению;

β-сплавы — это высоколегированные сплавы со стабильной структурой β-фазы, имеющие высокую коррозионную стойкость. Для получения соединений сплавов этого класса наиболее перспективными являются аргонодуговая и электронно-лучевая сварка.

Для изготовления сварных конструкций из титана и его сплавов различных классов применимы почти все способы сварки, используемые для получения соединений сталей и цветных металлов [3–11]. Однако до настоящего времени способ сварки титана вручную покрытыми электродами пока еще не разработан. Качество сварных соединений титана во многом определяется специфическим термомодеформационным циклом дуговой сварки, отличающимся от такового в случае сварки сталей. При сварке титана потери энергии меньше, а продолжительность пребывания в области высоких температур металла зоны термического влияния (ЗТВ) в 2...3 раза больше. Чувствительность к термическому циклу сварки проявляется в α→β-превращении, быстром росте зерна высокотемпературной β-фазы при нагреве выше области структурных превращений, перегреве и образовании хрупких фаз при охлаждении и старении.

Высокая химическая активность титана по отношению к составляющим воздуха ([O], [N], [H]) приводит к насыщению ими металла сварного со-

единения, а это в свою очередь — к его охрупчиванию и снижению механических свойств (пластичности, длительной прочности) и коррозионной стойкости. Значительное насыщение металла в процессе сварки происходит уже при $T \geq 350$ °С. В связи с этим необходимо обеспечить надежную защиту зоны сварки, имеющую температуру 350 °С, от контактов с воздухом. С этой целью используются аргон 1-го и высшего сортов (ГОСТ 10157 и EN 439), гелий высокой частоты (ТУ 51-940-8 и EN 439), их смеси (EN 439) и специальные бескислородные флюсы. Сварка в вакууме также исключает возможность взаимодействия титана с газами.

Необходимым условием получения качественных соединений титана и его сплавов является регулирование механических свойств и структуры металла швов и ЗТВ путем выбора оптимальных технологий и сварочных материалов, а также режимов сварки, обеспечивающих ее выполнение при минимально возможной погонной энергии. Качество полученных сварных соединений во многом определяется технологией подготовки кромок под сварку и составом (маркой) присадочной титановой проволоки.

Подготовку кромок заготовок выполняют с использованием газовой, плазменной и газолазерной резки (режущий газ — аргон) [12]. Газовую резку титана осуществляют на более высокой скорости и пониженной мощностью пламени по сравнению с резкой стали. Это связано с более интенсивным выделением тепла в зоне реза. После газовой и плазменной резки обработку кромок механическим способом следует выполнять на глубине 3...5 мм. После выполнения газолазерной резки в этом нет необходимости. При механической обработке шероховатость поверхности кромок должна быть не хуже $Rz = 40$ (ГОСТ 2789). Поверхности деталей, прилегающие к кромкам с обеих сторон на расстоянии не менее 20 мм, могут зачищаться шабером, электрокорундовым кругом, вращающейся металлической щеткой, мелкой наждачной шкуркой, кругами с накаткой из абразивного материала или вулканитовым кругом. При зачистке абразивными кругами не допускается перегрев металла, вызывающий на поверхности сварного соединения образование цветов побежалости. Непосредственно перед прихваткой и сваркой подготовленные поверхности сварного соединения, а также сварочная проволока обезжириваются. Влагу с них удаляют с помощью бязевых салфеток, смоченных ацетоном и техническим этиловым спиртом.

При выборе способов сварки титановых сплавов следует исходить из необходимости обеспечения надежной защиты зоны сварки и остывающих участков соединения от контактов с воз-

духом, а также учета особенностей соединения металла малой, средней и большой толщины.

Для сварки титана широко применяют дуговые способы сварки, из которых наиболее распространенной являются сварка неплавящимся вольфрамовым электродом в инертных газах (автоматическая, механизированная и ручная). Они далее будут рассматриваться в настоящей работе.

Способ сварки ТИГ является универсальным, поскольку позволяет выполнять соединения в различных пространственных положениях, в том числе в стесненных условиях, и не требует переналадки оборудования при изменении толщины свариваемого металла и типа соединения.

Сварка ТИГ титана выполняется на постоянном токе прямой полярности. Вольфрамовый электрод является катодом и от его стойкости к разрушению, формы заточки, постоянства эмиссионной способности во многом зависят стабильность процесса сварки, качество формирования швов и глубина провара. Электроды из чистого (нелегированного) вольфрама из-за малой стойкости к разрушению для сварки титана непригодны. Для этого способа сварки применяют электроды из легированного вольфрама марок ЭВЛ (WL10), ЭВИ-2, ЭВТ-12 (WT20) в соответствии с ГОСТ 23949-80 (EN 26848 NF). Диаметр неплавящегося электрода выбирают в зависимости от значений сварочного тока с учетом допустимой нагрузки по току. Угол заточки составляет 30...45°. Перед началом работы заточенный вольфрамовый электрод подвергают обработке путем пятикратного зажигания дуги на рабочем токе. При продолжительной работе электрод постепенно разрушается и его следует периодически перезатачивать [5, 6, 9].

В зависимости от размеров и конфигурации свариваемых изделий из титана применяют следующие типы защиты зоны сварки инертным газом [5, 6, 9]:

общая защита изделия в камере с контролируемой атмосферой инертного газа, обеспечивающая наиболее надежную и стабильную защиту зоны сварки и остывающих участков сварного соединения сверху и снизу корня шва. Используется в серийном производстве и при изготовлении изделий сложной формы;

местная защита сварного соединения с использованием малогабаритных камер, обеспечивающая стабильное качество сварных соединений при сварке поворотных и неповоротных стыков трубчатых конструкций. При этом обратная сторона шва защищена благодаря заполнению инертным газом полости изделия или его части;

струйная защита зоны сварки и остывающих участков соединения, осуществляемая путем их непрерывного обдува с помощью сопла с увеличенным по сравнению с другими металлами диа-

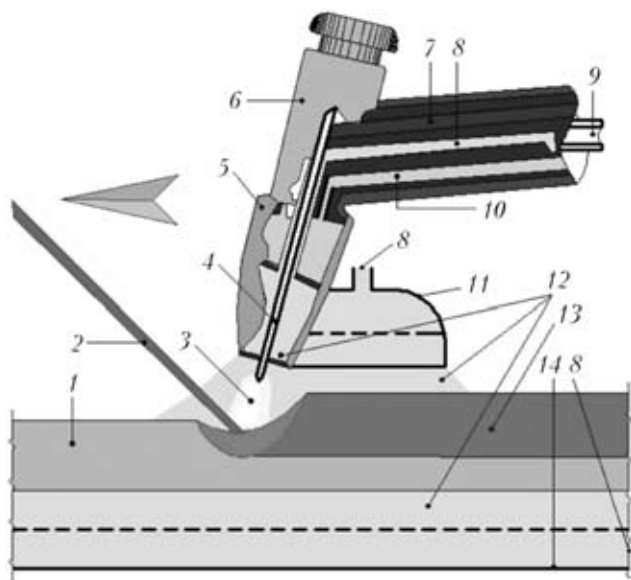


Рис. 1. Схема ручной сварки ТИГ титана: 1 — свариваемый металл; 2 — присадочная проволока; 3 — дуга; 4 — неплавящийся электрод; 5 — сопло; 6 — корпус горелки; 7 — подача охлаждающей воды; 8 — подача защитного газа; 9 — токоподвод; 10 — отвод воды; 11 — насадка для защиты остывающих участков шва; 12 — защитная среда; 13 — металл шва; 14 — приспособление для защиты обратной стороны шва

метром отверстия и удлиненной насадкой. Обдув корня шва происходит с подачей инертного газа снизу. При этом защитный газ подается по трем каналам — в сопло 5, удлиненную насадку 11 и формирующую защитную подкладку 14 (рис. 1). Несмотря на то, что обеспечить надежную защиту в этом случае сложно, указанный способ сварки получил широкое распространение в сварочном производстве. Стабильное высокое качество сварных соединений, выполненных на воздухе, обеспечивается путем применения автоматической сварки.

При ручной сварке ТИГ для защиты остывающих участков сварного соединения используют насадку 11 (рис. 1), закрепленную на горелке. Ее ширину выбирают в зависимости от ширины ЗТВ сварного соединения, а длину при сварке тонкой пластины находят из выражения

$$l = (0,006 I_{св}^2 U_{д}^2) / (T^2 v_{св} b)^{d_c/2},$$

где $I_{св}$ — ток сварки, А; $U_{д}$ — напряжение на дуге, В; T — температура, ниже которой металл не следует защищать ($T < 400$ °С); $v_{св}$ — скорость сварки, см/с; b — толщина металла, см; d_c — внутренний диаметр сопла, см.

Защиту корня шва и прилегающих нагретых участков сварного соединения осуществляют путем плотного поджатия кромок к медным или стальным подкладкам с формирующими канавками и системой отверстий для подачи защитного газа (рис. 2) [5, 6, 9].

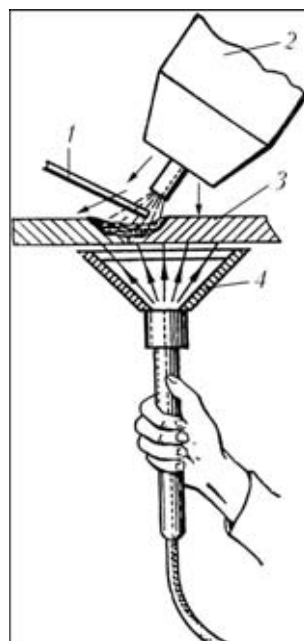


Рис. 2. Схема защиты корня шва при выполнении ремонтной сварки: 1 — присадка; 2 — горелка; 3 — изделие; 4 — местный поддув

Во избежание перегрева металла свариваемых кромок при дуговой сварке титана ограничивают максимальный сварочный ток. Так, при сварке поверхностной дугой неплавящимся электродом он не должен превышать 300 А. Это позволяет сваривать за один проход без разделки кромок пластины титана с $b \leq 3$ мм. Стыковые соединения пластин титана большой толщины выполняют многослойной сваркой с разделкой кромок и использованием присадочной проволоки. При сварке титана осуществляют следующую разделку кромок: при толщине пластины 4...10 мм — V-образную с углом раскрытия 70...90°; при $b = 10...15$ мм — X-образную с углом раскрытия 50...70°; при $b > 15$ мм — рюмкообразную с углом раскрытия 30°. Притупление во всех случаях составляет 1,5...2,0 мм, а зазор — не более 10 % толщины пластины титана.

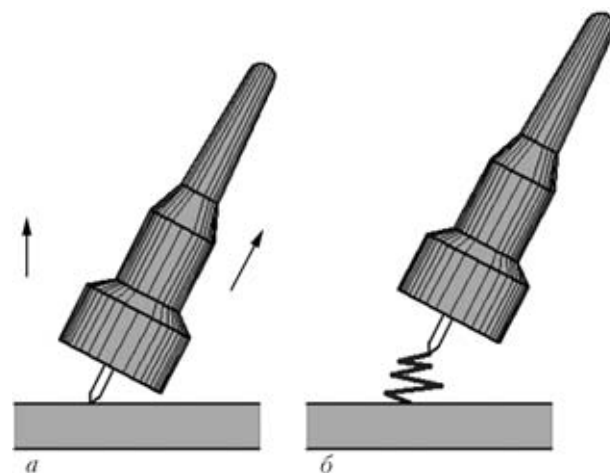


Рис. 3. Схема поджига дуги при ручной сварке ТИГ титана с использованием горелки с «газовой линзой» касанием (а) и с помощью осциллятора — устройства стабилизации горения дуги (б)

Для удаления воздуха из газовой системы защитный газ в горелку и защитные приспособления подаются за 1...2 мин до начала сварки. Поджиг дуги осуществляется касанием изделия вольфрамовым электродом (рис. 3, а) или с помощью осциллятора (рис. 3, б). Перед началом сварки на принятом режиме качество защиты рекомендуется проверить на титановом образце путем поджиг дуги на «точку», которая должна иметь блестящий серебристый цвет. Ручную сварку выполняют без колебательных движений горелки на короткой дуге углом вперед. Угол между электродом и присадочной проволокой поддерживается в пределах 90° , а подача проволоки осуществляется непрерывно. При этом необходимо следить за тем, чтобы разогретый конец присадочной проволоки был постоянно защищен инертным газом. Если в силу каких-либо причин он подвергнется воздействию воздуха, то окисленный конец следует удалить механическим способом. После окончания сварки или случайного обрыва дуги защитный газ должен подаваться до тех пор, пока металл не остынет до $T < 400^\circ\text{C}$.

Об эффективности газовой защиты при сварке и последующем охлаждении сварного соединения можно судить по внешнему виду шва: о хорошей защите и высоких свойствах соединения свидетельствует его блестящая серебристая поверхность. Защита считается удовлетворительной, если поверхность шва имеет соломенно-желтый цвет. Такой шов допускается оставлять без исправления. Если поверхность шва приобрела светло-синий цвет, то ее необходимо зачистить металлической щеткой. Швы с поверхностью синего или серого цвета не допустимы и подлежат удалению.

Следует учитывать то, что хорошая защита при сварке влияет не только на качество швов, но и на стойкость неплавящегося электрода.

Для сварки титановых сплавов разных классов разработаны и выпускаются промышленностью сварочные титановые проволоки различного состава, которые в соответствии с ГОСТ 27265–87 и AWS A5.16/A5.16M:2004 [3, 4, 9, 13] поставляются в травленном и дегазированном состоянии. В качестве присадки могут использоваться также прутки из основного металла, которые предварительно должны подвергаться вакуумному отжигу. При сварке коррозионностойких титановых сплавов, легированных небольшими добавками, например палладия или рутения, для обеспечения необходимой коррозионной стойкости металла швов присадочная проволока также должна быть легирована этими элементами.

Ориентировочные режимы ручной сварки ТИГ титана следующие: $b = 3$ (10) мм; диаметр вольфрамового электрода $d_w = 2,5...3,0$ (3,0...4,0) мм; диаметр присадочной проволоки $d_n = 2,0...3,0$

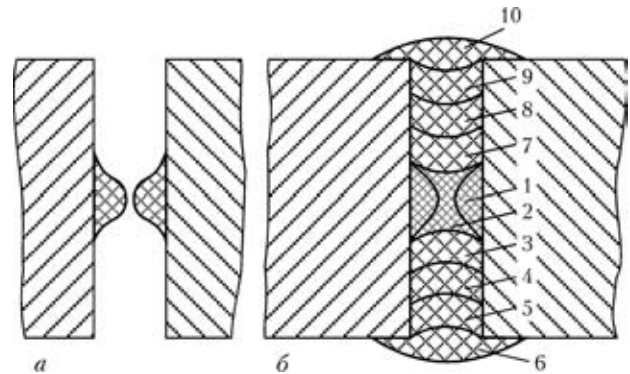


Рис. 4. Схема последовательности выполнения сварки по щелевому зазору: а — соединение с наплавками, собранное под сварку; б — порядок выполнения проходов (обозначен цифрами)

(2,0...3,0) мм; $I_{св} = 120...150$ (160...200) А; $U_d = 10...14$ (12...16) В.

Для повышения производительности ручной сварки ТИГ конструкций из толстолистового титана ($b \geq 15$ мм) разработана технология сварки низколегированных титановых сплавов по щелевому зазору без скоса кромок. По сравнению со сваркой с X-образной разделкой кромок эта технология имеет следующие преимущества: снижение в 2...3 раза объема и массы наплавленного металла, что позволяет сократить расход дорогостоящих сварочных материалов и повысить производительность процесса сварки в 2...3 раза; возможность регулировки механических свойств сварных соединений как путем изменения химического состава сварочных проволок, так и использования эффекта контактного упрочнения металла шва, работающего в условиях, характерных для так называемых мягких прослоек; наличие щелевого зазора, улучшающего газовую защиту, стабилизирующего сварочный процесс и повышающего КПД источника нагрева; уменьшение накладных расходов благодаря сокращению механической обработки кромок под сварку, а также расхода электроэнергии [1, 5].

Перед сборкой под сварку к торцам кромок, предварительно обработанных механическим способом, приваривают выводные планки из листа титана с $b = 3...4$ мм, а в средней части кромки выполняют трехслойную наплавку (рис. 4, а). Для обеспечения плавного перехода от наплавленного валика к кромкам свариваемого металла часто выполняют сглаживающие валики без присадки. Подготовленные таким образом детали собирают под сварку и прихватывают с зазором 2...3 мм между наплавленными слоями.

Сварка соединений по щелевому зазору осуществляется в определенной последовательности (рис. 4, б). Сначала выполняют соединительные швы ($I_{св} = 160...180$ А), затем — первый проход с использованием присадочной проволоки ($d_n = 3...4$ мм), а второй с обратной стороны без при-

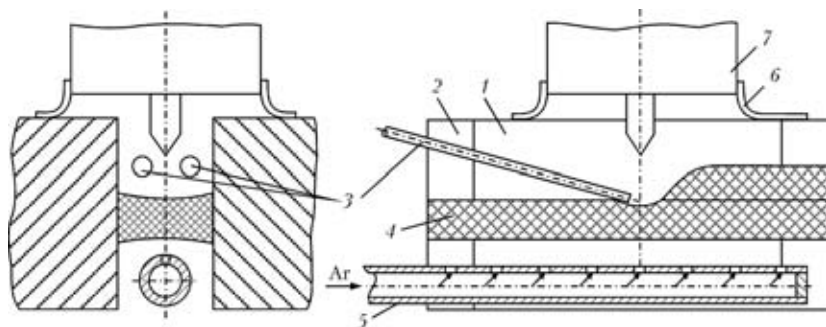


Рис. 5. Схема сварки по щелевому зазору: 1 — свариваемая деталь; 2 — выводные планки; 3 — двоякая присадка; 4 — наплавленный металл; 5 — приспособление для поддува; 6 — щиток-отражатель; 7 — сопло горелки

садки. Основные слои выполняют на токе: $I_{св} = 380...400$ А и $d_{п} = 5$ мм.

Получение качественного соединения обеспечивается при условии, если поверхность каждого слоя будет иметь вогнутую менисковую форму с плавным переходом к кромкам свариваемых деталей, что исключает образование межваликовых несплавлений.

Сварка по щелевому зазору имеет ряд особенностей. Так, вылет вольфрамового электрода с $d_{п} = 4$ мм устанавливается из расчета расположения сопла горелки на расстоянии 2 мм от поверхности свариваемых листов. Ось электрода должна быть перпендикулярна к поверхности листов, обратная сторона шва защищена от окисления струей аргона, которая подается через трубку с радиальными отверстиями (рис. 5).

При выполнении внутренних слоев расход аргона составляет 12...14 л/мин. Узкая и глубокая щель обеспечивает качественную защиту наплавленного металла без применения насадок; при этом используется щиток-отражатель, который надевается на сопло горелки. При наложении внешних слоев применяют насадку для дополнительной подачи аргона 6...8 л/мин. Для соединения титановых плит шириной $b = 110$ мм предложена технология сварки вольфрамовым электродом в узкий зазор магнитоуправляемой дугой [11]. Сварные швы, выполненные по указанным технологиям, отличаются высоким качеством. Поры и другие дефекты в них отсутствуют.

Для повышения эффективности сварки ТИГ титановых сплавов разработан [5–7] и впервые применен способ сварки неплавящимся вольфрамовым электродом с применением фторидных флюсов-паст (ТИФ-Ф). Сварка

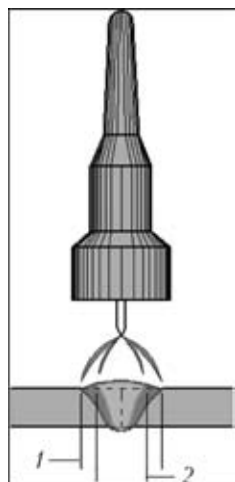


Рис. 6. Схема геометрии сечения металла шва при сварке ТИГ с непрерывной (1) и импульсной (2) дугой

ТИГ-Ф расширяет технологические возможности дуги, позволяет увеличить глубину проплавления, уменьшить погонную энергию процесса сварки и предупредить образование пор в металле шва. Этот способ сварки дает возможность сваривать за один проход без разделки кромок титановые плиты шириной $b \leq 6$ мм, выполнять швы

любого типа с использованием присадочной проволоки и без нее, в нижнем положении и на вертикальной плоскости. Расход флюса не

зависит от толщины свариваемого металла и составляет около 10 г на погонную длину шва 1 м. Дальнейшим развитием способа сварки ТИГ-Ф является сварка с присадочной порошковой проволокой, позволяющая выполнять швы за один проход без разделки кромок на титановых плитах толщиной $b = 5...16$ мм. Расход присадочной порошковой проволоки составляет около 1,5 м на погонную длину шва 1 м. При этом поры в металле шва отсутствуют. Однако сварка ТИГ-Ф требует высокой точности сборки свариваемых заготовок [5–7, 14].

В настоящее время широкое применение нашли также механизированная и автоматическая сварка неплавящимся электродом в инертных газах. Эти способы сварки позволяют изменять в широком диапазоне размеры и форму сварных соединений, обеспечивают получение швов с удовлетворительным качеством поверхности. При сварке пластин титана толщиной $b \geq 6$ мм выполняют двухстороннюю сварку. К недостаткам указанных способов сварки следует отнести склонность металла шва к образованию пор и высокий уровень деформаций в сварных соединениях. Устранить или уменьшить эти недостатки позволяет использование импульсно-дуговой сварки (рис. 6). Регулируя ток, скорость, а также длительность импульса и паузы, можно в широких пределах изменять размеры швов. Применение импульсно-дуговой сварки ТИГ обеспечивает хорошее формирование сварного шва с плавным переходом к основному металлу, а также уменьшает неравномерность поля остаточных напряжений и уровень их концентрации в зоне сварки при эксплуатации изделий под нагрузкой [5, 6].

С целью увеличения проплавляющей способности дуги при сварке ТИГ разработаны ряд усовершенствований этого процесса: сварка погруженной дугой без и с электромагнитным перемешиванием металла сварочной ванны, сквозным проплавлением, двухдуговая и др. [1, 3–7, 9–12, 15–17].

При сварке погруженной дугой конец вольфрамового электрода с помощью специальной принудительной автоматической системы регулиро-

вания напряжения на дуге (изредка вручную) опускается ниже поверхности свариваемого металла. За счет увеличения коэффициента эффективности тепловой мощности дуги удается сваривать за один проход без разделки кромок листы титана толщиной $b \leq 15$ мм, а при двухсторонней сварке — $b \leq 36$ мм. При этом сварные швы с каждой стороны листа выполняют в два прохода без использования присадочной проволоки: первый проход осуществляют погруженной дугой для получения требуемой глубины проплавления; второй — поверхностной дугой для сглаживания шва и придания ему требуемых геометрических размеров. Недостатками указанного способа сварки являются получение шва большой ширины, крупнокристаллическая структура металла, невозможность регулировать его химический состав, а также высокая склонность к порообразованию. Применение способа сварки с электромагнитным перемешиванием позволяет улучшить структуру металла шва и значительно уменьшить его пористость [1, 15, 17].

Для повышения коэффициента наплавки при многослойной односторонней сварке ТИГ в разделку листов титана ($b \leq 50$ мм) разработаны технология и оборудование для сварки двумя вольфрамовыми электродами, расположенными в плоскости, перпендикулярной оси шва. При таком способе сварку листов титана толщиной $b = 50$ мм выполняют за 6...8 проходов с использованием присадочной проволоки ($d_{\text{п}} = 5...7$ мм). Указанный способ сварки нашел применение и для наплавки [5, 16].

Сварка ТИГ сквозным проплавлением позволяет за один проход соединять листы титана толщиной $b \leq 12$ мм. Для получения проплавления типа «замочная скважина» установочная длина дуги должна составлять 0,5...1,0 мм, а режим сварки назначается так, чтобы под дугой по мере ее продвижения образовывалось отверстие, заполняемое жидким металлом. Для усиления шва требуется выполнение второго прохода с использованием присадочной проволоки.

Сваркой ТИГ поверхностной дугой выполняют поворотные и неповоротные стыки трубопроводов, а также вварку труб в трубные доски. В этом случае применяют специализированное оборудование, не используемое при других способах сварки [1, 5, 6, 18].

Для получения неразъемных соединений титана без разделки кромок изделий толщиной $b \leq 10$ мм наряду со сваркой ТИГ применяют плазменную сварку (ПС). При этом используют такие же средства защиты, как и при сварке ТИГ. В переднюю часть сварочной ванны возможно введение присадочной проволоки. При ПС к скорости подачи присадочной проволоки и ее диаметру

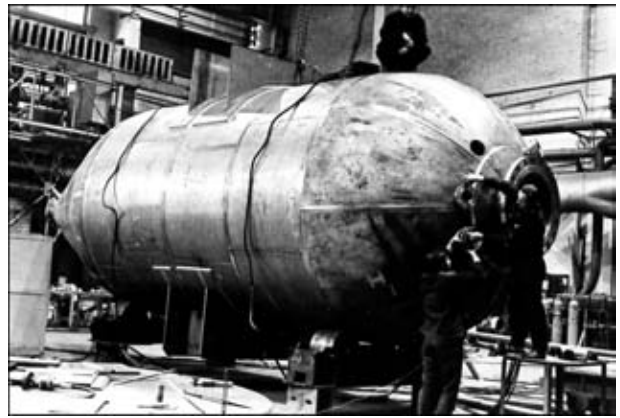


Рис. 7. Изготовление гидролизного аппарата из сплава АТЗ с толщиной корпуса 24 мм

предъявляются менее жесткие требования, чем в случае сварки ТИГ. ПС выполняется с одно- или двухсторонней V-образной разделкой кромок [1, 5, 6, 19].

Для соединения титановых пластин толщиной $b \leq 1,5$ мм применяют микроплазменную сварку (МПС), которую осуществляют на постоянном токе прямой полярности дугой, горячей в непрерывном или импульсном режимах. В качестве плазмообразующего газа используют аргон, защитного газа — гелий или смесь $\text{Ar} + 50...75\% \text{He}$. При сварке изделий из титана толщиной $b \leq 0,3$ мм соединение выполняют с отбортовкой кромок. Средняя рабочая длина дуги при МПС почти на порядок больше, чем при сварке ТИГ, и поэтому при указанном способе сварки допускаются большие отклонения от заданной длины дуги без особого влияния на параметры шва. Для обеспечения процесса стабильного формирования особое значение приобретают форма и размеры соединения [5, 6, 20].

При изготовлении химических аппаратов, например гидролизного (рис. 7) вместимостью 47 м^3 из титана применяют сразу несколько способов сварки ТИГ. При этом следует отметить, что избежать использования ручной сварки ТИГ не удастся. Все швы корпуса аппарата выполнены автоматической сваркой ТИГ погруженной дугой без присадки, швы днищ — ручной сваркой ТИГ с разделкой и использованием присадочной проволоки $d_{\text{п}} = 3...5$ мм из сплава 2В. Сварочные автоматы оборудованы фартуками гусеничного типа, копирующими форму свариваемых поверхностей и обеспечивающими надежную защиту остывающих участков сварного соединения. Защиту обратной стороны шва осуществляли с помощью приспособления, обеспечивающего равномерный поддув аргоном по всей длине свариваемого стыка. Сварку выполняли в два прохода с каждой стороны. Фланцы большого диаметра изготавливали сваркой ТИГ по щелевому зазору с последующей правкой и механической обработкой. Штуцера и люки собирали с корпусом на



прихватках и приваривали ручной сваркой ТИГ с разделкой кромок [1, 5, 6].

Основными дефектами, возникающими при сварке ТИГ титана, являются поры, холодные трещины, удлиненные газовые каналы. Титан и его сплавы не склонны к образованию кристаллизационных (горячих) трещин. Основной причиной снижения долговечности их сварных соединений являются поры. Удлиненные полости образуются в корне швов, выполненных автоматической сваркой ТИГ погруженной дугой в аргоне [1, 5, 6, 21, 22]. Не допускаются дефекты швов в виде трещин, непроваров, прожогов кратера и подрезов, а также швы с синим или серым цветом поверхности. Исправление дефектов (кроме цветов побежалости) осуществляется подваркой. Места расположения дефектов перед подваркой тщательно зачищают, а концы трещин засверливают. Подварку одного и того же места рекомендуется производить не более двух раз с использованием той же технологии сварки ТИГ, что и для сварки изделий.

Для контроля качества и выявления дефектов сварных соединений из титана применяют те же методы, что и при сварке сталей. В процессе изготовления изделий проверяют качество и состояние свариваемых изделий, сварочных материалов, соответствие подготовки кромок и сборки под сварку требованиям технических условий, стандартов и чертежей. При этом должен соблюдаться технологический процесс сварки и термической обработки. Для выбора методов и объема контроля необходимо обоснование их экономической целесообразности [22].

1. *Изготовление и эксплуатация оборудования из титана* / Г. М. Шеленков, В. Е. Блашук, Р. К. Мелехов и др. — Киев: Техника, 1984. — 120 с.
2. *Машиностроение. Энциклопедия. Т. II: Цветные металлы и сплавы* / Под общ. ред. И. Н. Фридляндера. — М.: Машиностроение, 2001. — 880 с.
3. *Melechow R., Tubielewicz K., Blaszyk W. Titan i jero stopy.* — Czestochowa: WPC, 2004. — 397 S.

4. *Блашук В. Е.* Титан: сплавы, сварка, применение // Автомат. сварка. — 2004. — № 3. — С. 39–46.
5. *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов* / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, В. Е. Блашук и др. — Киев: Наук. думка, 1986. — 240 с.
6. *Гуревич С. М.* Справочник по сварке цветных металлов. — Киев: Наук. думка, 1990. — 512 с.
7. *Zamkov V. N., Prilutskii V. P., Shevelev A. D.* Metallurgy and technology of welding titanium alloys // *Welding and Surfacing Rev.* — 1992. — 2. — P. 1–39.
8. *Штамповка, сварка, пайка и термообработка титана и его сплавов в авиастроении* / Под ред. А. Г. Братухина. — М.: Машиностроение, 1997. — 600 с.
9. *American welding society: Welding handbook.* — Miami: American welding society, 1998. — Vol. 4. — 621 p.
10. *Блашук В. Е., Шеленков Г. М.* Сварка плавлением титана и его сплавов (Обзор) // Автомат. сварка. — 2005. — № 2. — С. 38–46.
11. *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.
12. *Гаврилюк В. С., Измайлова Г. М.* Лазерная сварка титанового сплава OT4 по лазерному резу // *Технология металлов.* — 2005. — № 1. — С. 23–26.
13. *McMasters J. A., Sutherlin R. C.* Update: titanium specification revised // *Welding J.* — 2004. — № 5. — P. 43–47.
14. *Замков В. Н., Прилуцкий В. П.* Способы сварки титановых сплавов // Автомат. сварка. — 2005. — № 8. — С. 45–48.
15. *Сварка с электромагнитным перемешиванием* / В. П. Черныш, В. Д. Кузнецов, А. Н. Брискман, Г. М. Шеленков. — Киев: Техника, 1983. — 127 с.
16. *Замков В. Н., Топольский В. Ф., Кушниренко Н. А.* Двух-дуговая сварка толстолистового титана вольфрамовыми электродами // Автомат. сварка. — 1978. — № 2. — С. 44–47.
17. *Сварка погруженным вольфрамовым электродом сплава BT20 по необработанному кромок* / Б. И. Долотов, В. И. Муравьев, Ю. Л. Иванов, Б. Н. Марьин // *Свароч. пр-во.* — 1997. — № 7. — С. 25–27.
18. *Блашук В. Е., Шеленков Г. М., Трояновский В. Э.* Сварка труб с трубными решетками теплообменных аппаратов их титановых сплавов // Автомат. сварка. — 2005. — № 9. — С. 40–42.
19. *Плазменная сварка титановых сплавов* / В. Е. Блашук, Л. М. Оноприенко, Г. М. Шеленков и др. // Там же. — 1993. — № 3. — С. 31–33.
20. *Микроплазменная сварка* / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Наук. думка, 1979. — 248 с.
21. *Троцкий В. А.* Краткое пособие по контролю качества сварных соединений. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1977. — 224 с.
22. *Роянов В. А., Зусин В. Я., Самотугин С. Р.* Дефекты в сварных соединениях и покрытиях. — Мариуполь: ПГТУ, 2000. — 184 с.

Peculiarities of utilisation of TIG welding methods for joining titanium and its alloys are considered. Recommendations are given for application of different welding methods and their advantages and drawbacks are noted.

Поступила в редакцию 20.02.2006