



## СВАРКА ПЛАВЛЕНИЕМ ТИТАНА И ЕГО СПЛАВОВ (ОБЗОР)

**В. Е. БЛАЩУК**, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
**Г. М. ШЕЛЕНКОВ**, канд. техн. наук (ОАО «Сум. машиностроит. НПО им. М. В. Фрунзе», г. Сумы)

Сделан обзор практического применения различных способов сварки плавлением титана и его сплавов. Приведены рекомендации по применению этих способов сварки и отмечены их преимущества и недостатки.

*Ключевые слова:* лучевые способы сварки, сварка плавящимся и неплавящимся электродом в защитных газах и вакууме, сварка плавящимся электродом под флюсом, электрошлаковая сварка, плазменно-дуговая и микроплазменная сварка, титан, титановые сплавы, технологические возможности, толщина свариваемого металла

Титан и его сплавы отличаются особыми физико-механическими свойствами — высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью в атмосферных условиях, морской воде и ряде высокоагрессивных сред, в которых многие традиционные материалы проявляют низкую или недостаточную стойкость [1].

Объем промышленного применения титана и его сплавов во многом зависит от технологических возможностей процесса его сварки. Существенные трудности при сварке титана возникают в первую очередь из-за его высокой химической активности при повышенных температурах. В результате взаимодействия с газами атмосферы сплавы титана теряют пластичность и приобретают склонность к замедленному разрушению. В швах образуются дефекты (например, поры), вследствие чего имеет место значительное снижение сопротивления усталости, приводящее к разрушению сварной конструкции. Сварка термически нестабильных сплавов затруднена в связи с особенностями структурных изменений и фазовых превращений в металле шва и зоне термического влияния (ЗТВ) при термомеханическом цикле сварки, в результате которого возможно образование хрупких и нестабильных фаз. Однако путем выбора соответствующих способов сварки, применения оптимальных режимов сварки и последующей термической обработки в большинстве случаев удается получить работоспособные сварные соединения.

На сегодня для соединения титана и его сплавов нашли практическое применение большинство существующих способов сварки плавлением (за исключением ручной дуговой сварки штучными электродами) [1–7].

Цель настоящей работы — систематизация сведений о технологических возможностях способов сварки плавлением титана и его сплавов применительно к соединению металла различных толщин.

Основной трудностью, возникающей при сварке плавлением титана, является обеспечение надежной защиты от контактов с воздухом сварочной ванны,

корня шва, а также остывающих участков сварного соединения.

Защите подлежат участки сварного соединения, нагретые выше температуры, при которой начинается заметное взаимодействие титана с газами атмосферы. В отечественной литературе и инструктивных материалах ее считают равной 400 °С [2–4], а в стандартах Американского сварочного общества — равной 500 °F (250 °С) [7]. Для защиты используют вакуум и инертные газы аргон, гелий, а также их смеси. В связи с тем, что качество сварного соединения зависит от чистоты инертного газа, для защиты применяют аргон 1-го (объемная доля аргона не менее 99,987 %) и высшего сортов (ГОСТ 10157–79) и гелий высокой чистоты (ТУ 51-940–80). В западных странах применяют в соответствии с EN439:1994 аргон (EN439 class 11) и гелий (EN439 class 12), а также их смеси (EN439 class 13); выбор защитных газов осуществляют в соответствии с ANSI/AWS C5.6-94R [7].

В зависимости от размеров свариваемых изделий и требований к их качеству используются следующие варианты защиты зоны сварки инертным газом:

общая защита изделия в камере с контролируемой атмосферой. В этом случае удается обеспечить наиболее надежную защиту зоны сварки, а также остывающих участков шва, его корня и ЗТВ. Применение такого типа защиты целесообразно в серийном производстве и при изготовлении изделий сложной конструкции;

локальная защита сварного соединения с использованием местных микрокамер, которые находят применение главным образом при сварке кольцевых неповоротных и поворотных стыков, обратная сторона шва при этом защищена благодаря заполнению инертным газом полости изделия;

струйная защита зоны сварки и остывающих участков соединения, осуществляемая их непрерывным обдувом с помощью сопла с увеличенным по сравнению с другими металлами и сплавами диаметром отверстия и удлиненной насадкой. Обдув корня шва происходит с помощью дополнительного приспособления с подачей инертного газа снизу [2–9]. Таким образом, в этом случае защитный газ подается в три канала: в сопло и защитные приспособления — удлиненную насадку и формирующую защитную подкладку.

Сварка титановых сплавов в вакууме выполняется при давлении остаточных газов  $1 \cdot 10^{-2}$  Па. Находит также применение сварка в низком (около

1...10 Па) вакууме. По содержанию кислорода и азота такая среда намного чище, чем аргон 1-го сорта. При сварке в вакууме полностью исключается загрязнение металла сварного соединения вредными примесями (газами) и обеспечивается максимальное приближение пластичности и вязкости сварного соединения к аналогичным свойствам основного материала (ОМ) [3–5, 8].

Качество сварных соединений титана во многом определяется технологией подготовки кромок деталей под сварку, а также маркой сварочной титановой проволоки. Подготовка кромок под сварку выполняется только механическим способом. Шероховатость поверхности кромок должна быть не хуже  $R_z = 40$  (ГОСТ 2789). Поверхность деталей, которые прилегают к кромкам с обеих сторон на расстояние не менее 20 мм, зачищаются шабером или электрокорундовым кругом, а также вращающейся металлической щеткой, мелкой наждачной шкуркой, кругами с накаткой из абразивного материала или вулканитовым кругом. При зачистке абразивными кругами не допускается перегрев металла, который вызывает образование на поверхности сварки соединения цветов побежалости. Непосредственно перед прихваткой и сваркой зачищенные поверхности сварного соединения и сварочную проволоку обезжиривают, затем удаляют влагу с помощью чистых бязевых салфеток, смоченных ацетоном и этиловым техническим спиртом.

Для сварки титана наиболее широкое применение нашли дуговые способы сварки, из которых наиболее распространенной является сварка неплавящимся вольфрамовым электродом в инертных газах (ТИГ). Этот способ сварки является наиболее универсальным, поскольку позволяет выполнять соединение в различных пространственных положениях, 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, формы заточки, постоянства эмиссионной способности во многом зависят стабильность процесса сварки, качество формирования швов и глубина провара. В таблице приведены данные о соответствии вольфрамовых электродов ряду национальных и международных стандартов. Электроды из чистого (нелегированного) вольфрама для сварки титана не применяются, поскольку не отличаются достаточной стойкостью [3, 4, 7]. Диаметр неплавящегося электрода выбирают в зависимости от значений сварочного тока с учетом допустимой нагрузки по току.

Автоматическая, механизированная и ручная сварка могут выполняться непрерывно горящей и импульсной дугой. При сварке ТИГ поверхностной дугой без разделки кромок за один проход соединяются листы титановых сплавов толщиной  $b \leq 5$  мм (максимальный сварочный ток  $I_{св} \leq 500$  А). Стыковые соединения титана больших толщин выполняют многослойной сваркой с разделкой кромок или в щелевую разделку и с подачей присадочной проволоки. В качестве присадочных материалов для сварки титана и его сплавов при-

меняют титановые сварочные проволоки, состав которых зависит от типа соединяемых материалов и последующей термообработки сварных изделий [1–4, 7].

Для соединения листов титана толщиной 0,5...2,0 мм применяют импульсно-дуговую сварку ТИГ, выполняемую импульсами тока прямой полярности. Регулируя сварочный ток и скорость сварки, а также длительность импульса тока и паузы, можно изменять размеры шва. При этом способе сварки уровень деформации титановых конструкций уменьшается на 15...30 % по сравнению со сваркой непрерывной дугой, снижаются также уровень остаточных напряжений и склонность к образованию в швах пор, которые являются основным дефектом при сварке поверхностной дугой. При этом уменьшается протяженность ЗТВ и размеры кристаллитов в металле шва, что способствует улучшению механических свойств сварных соединений [3, 4].

С целью повышения проплавляющей способности дуги при сварке ТИГ разработан ряд усовершенствований этого способа. Для соединения титана и его сплавов нашли применение следующие разновидности способа сварки ТИГ: погруженной дугой без и с электромагнитным перемешиванием сварочной ванны, сквозным проплавлением, сварка по флюсу, с присадочной порошковой проволокой, в узкую (щелевую) разделку, двухдуговая и др. [2–12].

При сварке погруженной дугой конец вольфрамового электрода находится ниже поверхности свариваемого металла. Это приводит к значительному увеличению коэффициента эффективности использования тепловой мощности дуги и позволяет сваривать за один проход без разделки кромок листы металла толщиной  $b \leq 15$  мм. В случае двухсторонней сварки с помощью этого способа можно сваривать листы титана толщиной  $b \leq 36$  мм. При этом сварные швы с каждой стороны листа выполняются в два прохода без применения присадочной проволоки: первый проход — погруженной дугой для получения требуемой глубины проплавления; второй — поверхностной дугой для сглаживания шва и придания ему требуемых геометрических размеров.

Погружение дуги осуществляют вручную (при малой толщине свариваемых листов металла —  $b \approx 8...10$  мм) или специальной принудительной автоматической системой регулирования напряжения на дуге. К недостаткам этого способа сварки относятся большая ширина шва и крупнокристаллическая структура его металла, а также невоз-

Соответствие стандартов на вольфрамовые электроды

ISO 6848, EN26848 NF EN26848, JIS Z3233, AWS A5.12-98	ANSI/AWS A5.12	Типы вольфрамовых электродов	ГОСТ 23949-80	Номинальное содержание активизирующей присадки
WC20	EWCe-2	R 07932	—	2 % CeO <sub>2</sub>
WL10	EWLa-1	R 07941	ЭВЛ	1 % La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
WT20	EWTh-2	R 07912	ЭВТ-12	2 % ThO <sub>2</sub>

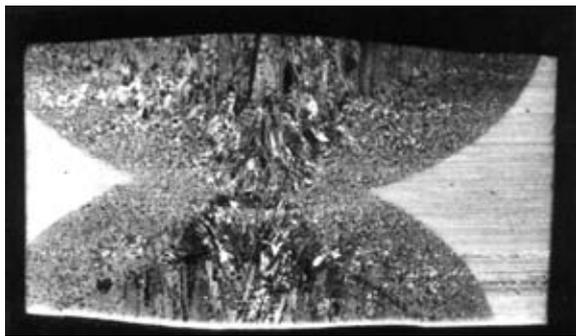


Рис. 1. Макрошлиф стыкового сварного соединения толщиной 24 мм, выполненного сваркой погруженной дугой

возможность регулирования химического состава металла и высокая склонность к образованию пор (рис. 1) [2–4, 10].

При сварке погруженной дугой в аксиальном магнитном поле возбуждение контролируемых движений жидкого металла в ванне создает возможность рационального воздействия на термokonцентрационные процессы, определяющие процессы кристаллизации. При этом имеет место улучшение структуры металла шва и резкое снижение его пористости [2–3, 11].

Сварка двумя дугами, горящими на вольфрамовых электродах в аксиальном магнитном поле, позволяет в 1,5...2,0 раза повысить допустимую скорость процесса без образования в швах таких специфических дефектов, сопутствующих форсированным режимам, как удлиненные газовые полости. Электромагнитное перемешивание сварочной ванны приближает уровень механических свойств и электрохимические характеристики сварного соединения к аналогичным показателям ОМ, а также способствует снижению дефектности, в частности пористости швов [2–3, 11].

Для повышения значения коэффициента наплавки при многослойной односторонней сварке ТИГ в разделку листов титана толщиной  $b \leq 50$  мм разработана сварка двумя вольфрамовыми электродами, расположенными в плоскости, перпендикулярной оси шва. При этом сварку листов металла  $b = 50$  мм выполняют за 6...8 проходов с использованием присадочной проволоки диаметром  $D_{пр} = 5...7$  мм. Этот способ нашел применение в тех случаях, когда состав металла шва отличается от ОМ, а также при выполнении наплавки. По-



Рис. 2. Макрошлиф стыкового сварного соединения толщиной 30 мм, выполненного двухдуговой сваркой с присадкой

лученные сварные соединения характеризуются высоким качеством (рис. 2). Указанный способ сварки и оборудование для него разработаны в ИЭС им. Е. О. Патона [3–5, 12].

Сварка ТИГ сквозным проплавлением позволяет за один проход сваривать листы металла  $b \leq 12$  мм; установочная длина дуги составляет 0,5...1,0 мм. Для получения проплавления типа «замочная скважина» режим сварки назначается так, чтобы под дугой в металле образовывалось отверстие, заполняемое по мере продвижения дуги жидким металлом. Для получения усиления шва при таком способе сварки требуется выполнение второго прохода с использованием присадочной проволоки. Сложность регулирования химического состава металла шва по всему его сечению ограничивает применение этого способа сварки [3, 4].

Эффективным способом воздействия на проплавляющую способность дуги, а также на формирование шва и структуру его металла является аргонодуговая сварка по флюсу (А-ТИГ), при которой в атмосферу дуги вводятся галогениды щелочных и щелочноземельных металлов, приводящие к изменению характера проплавления металла и формированию швов за счет контрагирования дуги. Сварка А-ТИГ по флюсу, наносимому на поверхности свариваемых кромок, позволяет получить однопроходные швы без разделки кромок на листах титана толщиной  $b \leq 6...7$  мм. При этом благодаря повышению концентрации тепловой энергии в анодном пятне значительно уменьшаются необходимые для сварки ток и погонная энергия. Флюс способствует не только увеличению глубины провара, но и изменению формы проплавления. Ширина обратного валика при сварке А-ТИГ с возрастанием сварочного тока увеличивается быстрее, чем ширина шва. Улучшаются условия формирования обратного валика и уменьшается вероятность прожогов при сварке на весу [3–5].

Низкая погонная энергия, малые ширина шва и ЗТВ позволяют применять сварку А-ТИГ не только для стыковых соединений, но и для угловых, тавровых, нахлесточных, электрозаклепочных и других соединений листов титана толщиной  $b \leq 3$  мм, сварка которых без применения флюса затруднена или невозможна. Сварка нахлесточных и электрозаклепочных соединений может осуществляться как со сквозным, так и неполным проплавлением нижнего листа. Малый объем сварочной ванны позволяет использовать сварку А-ТИГ для выполнения швов в различных пространственных положениях на вертикальной плоскости на листах титана при  $b \leq 6$  мм. В результате применения флюсов на 15...20 % снижается деформация конструкций, при этом пористость исключается. Этот способ сварки приобретает особое значение при соединении термически упрочняемых и высоколегированных сплавов. Однако при сварке А-ТИГ требуется более высокая точность сборки, чем при сварке ТИГ. Для указанного способа сварки титана разработаны специальные флюсы серии АНТ-А, а также ФАН-1 [3–5].

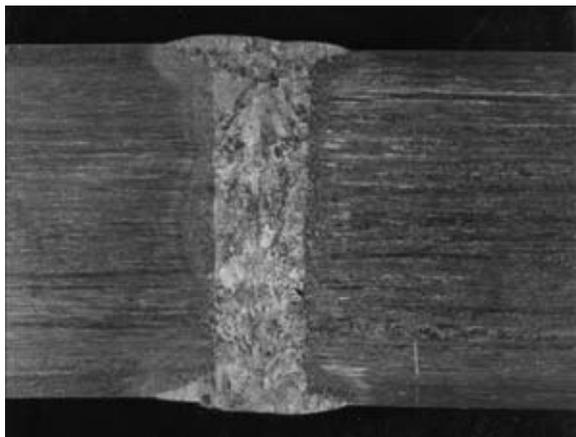


Рис. 3. Макрошлиф стыкового сварного соединения толщиной 24 мм, выполненного ручной сваркой в узкий зазор в аксиальном магнитном поле

С целью дозирования флюса при сварке листов титана толщиной  $b > 4...5$  мм его вводят в дугу в виде наполнителя присадочной порошковой проволоки с оболочкой из титана. При этом сохраняется возможность однопроходной сварки листов титана толщиной  $b \leq 16$  мм. После сварки А-ТИГ и с порошковой проволокой на поверхности шва остается слой затвердевшего шлака, который дополнительно защищает остывающий металл. Его следует удалять с помощью механической зачистки или химическим способом, что увеличивает трудоемкость сварочных работ.

Для соединения листов титана средней и большой толщины нашла применение сварка в узкий зазор. Этот способ сварки позволяет уменьшить примерно на 30 % объем наплавленного металла при повышении производительности процесса и снижении трудоемкости работ, связанных с подготовкой кромок под сварку. Для надежного сплавления металла шва со стенками разделки при ручной сварке вольфрамовым электродом используют горелку со специальным приспособлением, обеспечивающим сварку в реверсируемом аксиальном магнитном поле (рис. 3) [1–3, 11, 13].

Для сварки листов металла толщиной  $b \leq 110$  мм предложен способ автоматической сварки в узкий зазор вольфрамовым электродом дугой, управляемой магнитным полем. Указанный способ сварки позволяет снизить расход сварочных материалов, в 1,5... 2,0 раза повысить производительность процесса и уменьшить дефектность соединения титановых сплавов [3, 4, 13, 14]. Этот способ сварки обеспечивает получение металла швов с однородной структурой и высокие показатели механических и коррозионных свойств сварных соединений.

Для сварки поворотных и неповоротных стыков трубопроводов, а также сварки труб в трубные доски нашла применение сварка ТИГ поверхностной дугой. В этом случае применяется специализированное оборудование, не используемое при других способах сварки. Более подробно эти процессы рассмотрены в работах [2–4, 7, 15–17].

Для сварки неповоротных стыков титановых трубопроводов диаметром от 10 до 200 мм ( $b = 0,5...2,0$  мм) в монтажных условиях в ИЭС им. Е. О. Патона разработана и изготовлена гамма

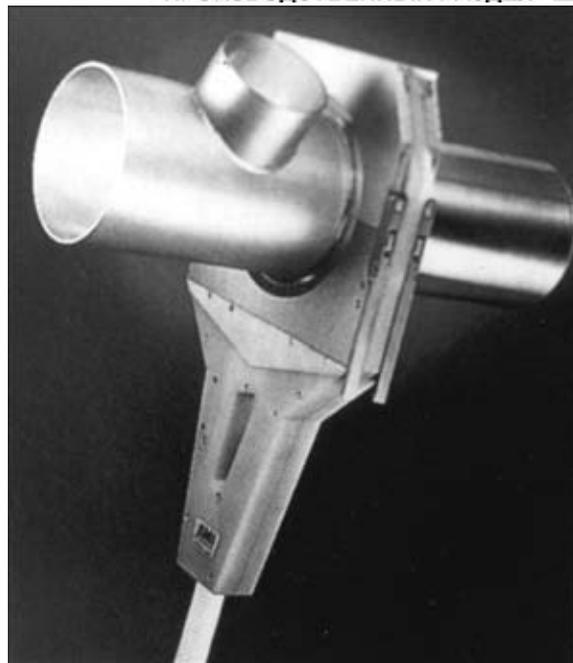


Рис. 4. Камера со встроенным электродвигателем привода вольфрамового электрода в монтажных условиях (производство компании «Arc Machines», США)

специализированного оборудования с накидными защитными микрокамерами, в которых благодаря продувке аргоном достигается необходимая чистота инертных газов. Такие камеры устанавливаются вокруг стана, вольфрамовый электрод перемещается с помощью электродвигателя, установленного как на расстоянии от камеры, так и в одном блоке с ней. Сварка может выполняться в непрерывном и импульсном режимах. На рис. 4 представлен общий вид современной сварочной микрокамеры, объединенной в один блок с электродвигателем.

Сварка ТИГ труб с трубными досками в теплообменниках из титановых сплавов выполняется в двух положениях — в нижнем и на вертикальной плоскости. Для сварки в нижнем положении в цеху оборудуется глубокая шахта для вертикального размещения теплообменника. При такой сварке трубная доска располагается в горизонтальной плоскости. При отсутствии шахт трубная доска размещается в вертикальной плоскости, а трубы в горизонтальной. В зависимости от размеров теплообменников и пространственного размещения швов находят применение и соответствующие способы сварки — ручная и автоматическая сварка ТИГ. Для этого используется специальное оборудование отечественного (ОАО СМНПО им. М. В. Фрунзе) и импортного (фирма ESAB, Швеция), «Astro Arc Polysonde», Франция и др.) производства [15–18].

Наряду со сваркой ТИГ для получения неразъемных соединений титана и его сплавов нашли применение способы сварки в инертных газах — плазменная (ПС) и микроплазменная (МПС), предназначенные для сварки листов титана толщиной  $b \leq 1,5$  мм. При этом используют способы защиты такие же, как и при сварке неплавящимся электродом. Способ ПС является высокоскоростным и высокопроизводительным процессом и вы-



полняется «сжатой» дугой цилиндрической формы за счет ее обжатия стенками сопла. Оборудование для ПС подразделяется на следующие типы: для сварки листов титана ( $b \leq 4$  мм) на небольшом и на большом токе, а также сварки плавящимся электродом дугой, горящей в потоке плазмы [1–4, 19–21].

При МПС титана в качестве источника нагрева используют сжатую дугу прямого действия, горящую между электродом и изделием. Стабильного горения и пространственной устойчивости микроплазмы на малых токах ( $I_{св} \geq 0,1$  А) достигают благодаря высокой степени сжатия столба дуги, которая обеспечивается при использовании сопла с каналом малого (до 1 мм) диаметра и непрерывно горящей от отдельного источника питания дежурной дугой. МПС титана осуществляется на постоянном токе прямой полярности дугой, горящей в непрерывном или импульсном режимах. В качестве плазмообразующего газа используют аргон, защитного газа — гелий или смесь  $Ar + 50...75\%$  He. Средняя рабочая длина дуги при МПС почти на порядок больше, чем при сварке неплавящимся электродом в аргоне, и поэтому при данном способе сварки допускаются сравнительно большие отклонения длины дуги от заданного значения без особого влияния на параметры шва. В случае сварки изделий из титана при  $b \leq 0,3$  мм соединения выполняют с отбортовкой кромок, а при  $b = 0,1...0,2$  мм сборка деталей под сварку производится в прецизионных приспособлениях. Стыковые соединения можно выполнять на весу, а также на подкладной планке. В ИЭС им. Е. О. Патона разработаны конструкции соответствующих плазмотронов, а также источники питания. Механические свойства соединений, выполненных МПС, практически равноценны ОМ. Применение указанного способа сварки исключает попадание вольфрама в шов.

При ПС достигается более глубокое проплавление, чем при сварке ТИГ. В связи с этим возможна ПС без разделки кромок изделия при  $b > 10$  мм. В случае ПС толстолистового титана с проплавлением типа «замочная скважина» максимальная толщина свариваемых листов при односторонней сварке в основном определяется шириной обратного валика, который формируется под действием сил поверхностного натяжения. В переднюю часть сварочной ванны возможно введение присадочной проволоки, причем к ее диаметру и скорости предъявляются не такие жесткие требования, как при сварке ТИГ. В этом случае форма разделки кромок одно- или двухсторонняя V-образная. Благодаря использованию присадочной проволоки расширяется диапазон параметров сварки (зазор, смещение кромок, скорость сварки), а также есть возможность управлять химическим и структурным средствами металла шва, тем самым предупреждается возникновение трещин, подрезов, пор, а также создается возможность значительного увеличения объема наплавленного металла.

Для объединения достоинств применения вакуумной защиты и технологических приемов сварки

неплавящимся электродом создан источник тепла, пригодный для сварочных процессов — дуговой разряд между полым неплавящимся катодом (ДРПК) из вольфрама или титана и изделием в вакууме, по удельным энергетическим показателям уступающий лишь лучевым источникам энергии. В процессе сварки через полый катод подается с малым расходом аргон. Реализация указанного процесса в 3...5 раз дешевле, чем лучевых способов сварки, за счет низкой стоимости оборудования, а также менее жестких требований по подготовке соединений под сварку и технике безопасности (соответствует уровню безопасности при дуговой сварке в контролируемой атмосфере). Дуговая сварка в вакууме позволяет в режиме сквозного проплавления сваривать изделия из титана при  $b = 8...12$  мм без разделки кромок за один проход на весу с плавным переходом к ОМ с лицевой и обратной стороны шва. Соединение листов титана толщиной  $b = 12...20$  мм выполняют без разделки кромок двухсторонней сваркой с подачей присадочной проволоки малого диаметра. Последняя должна пройти через плазму ДРПК и коснуться хвостовой части сварочной ванны. Этот способ сварки применяют для получения замыкающего шва шар-баллонов из титана. Служебные свойства сварных соединений, выполненных ДРПК, находятся на уровне или даже выше аналогичных свойств соединений, выполненных сваркой ТИГ.

Сварка плавящимся электродом диаметром 1,6...5,0 мм в инертных газах (МИГ) нашла применение при выполнении стыковых, тавровых и нахлесточных соединений листов титана при  $b \geq 3$  мм в нижнем положении. Сварку выполняют на постоянном токе обратной полярности. При сварке МИГ сплавов титана можно получить оптимальные свойства сварных соединений путем выбора состава металла шва при изменении химического состава плавящегося электрода или регулирования в них доли ОМ. При автоматической сварке применяют проволоку диаметром 1,6...5,0 мм, при механизированной полуавтоматической — диаметром 1,6...2,0 мм [1–4].

При сварке МИГ титана размеры швов, а также качество их формирования зависят от подаваемого в горелку защитного газа. Швы при сварке в гелии получаются с более плавным переходом от усиления к ОМ, чем при сварке в аргоне, а проплавление ОМ при прочих равных условиях, более широкое, но менее глубокое. Применение гелия позволяет повысить тепловую мощность дуги и производительность процесса расплавления, что особенно важно при сварке листов титана средней и большой толщины. Однако при сварке МИГ в аргоне происходит меньше разбрызгивание расплавленного металла, чем при сварке в гелии. При этом расход аргона в 2...3 раза меньше, чем гелия. При сварке в аргоне снижается также напряжение на дуге. Поэтому при сварке титана рекомендуется использование смеси  $0,8$  He +  $0,2$  Ar, обеспечивающей хорошее формирование швов и стабильность процесса. Сварка стыковых соединений из листов сплавов титана средней и большой толщины производят с разделкой кромок, опти-

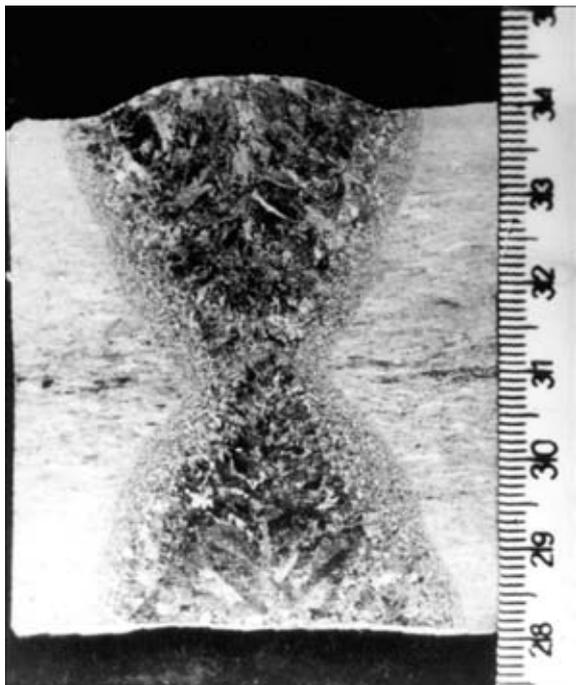


Рис. 5. Макрошлиф стыкового сварного соединения сплава ВТ1 толщиной 60 мм, выполненного двухсторонней сваркой МИГ в разделку

мальный угол раскрытия которых составляет  $60^\circ$  (рис. 5).

С целью увеличения коэффициента наплавки при стабильном горении дуги и возрастании скорости автоматической сварки МИГ предложен способ сварки плавящимся электродом, предварительно подогреваемым за счет омического сопротивления от отдельного низковольтного источника. При этом коэффициент наплавки увеличивается, а проплавляющая способность дуги уменьшается. Импульсно-дуговая сварка МИГ позволяет в монтажных условиях выполнять соединения в различных пространственных положениях, стабилизировать проплавление ОМ и практически полностью устранить разбрызгивание. Оно осуществляется за счет наложения мощных кратковременных импульсов тока на дугу постоянного тока и позволяет регулировать процесс формирования капли на конце электрода. Применение автоматической сварки МИГ обеспечивает высокие показатели пластичности, прочности и ударной вязкости металла швов.

Механизированная сварка МИГ в отличие от автоматической в основном применяется при выполнении тавровых соединений (например, вварка штуцеров) тонколистовых титановых конструкций. Это обусловлено повышенной массой горелки с защитными приспособлениями и трудностями обеспечения надежной защиты зоны сварки и остывающих участков шва. Для сварки в вакууме изделий из титана при  $b = 2...50$  мм предложена сварка плавящимся электродом диаметром 1,6... 5,0 мм на постоянном токе обратной полярности. При таком способе сварки обеспечивается значительная пластичность металла шва благодаря высокой частоте его по содержанию вредных примесей (газов). Указанный способ разрабатывался для сварки в

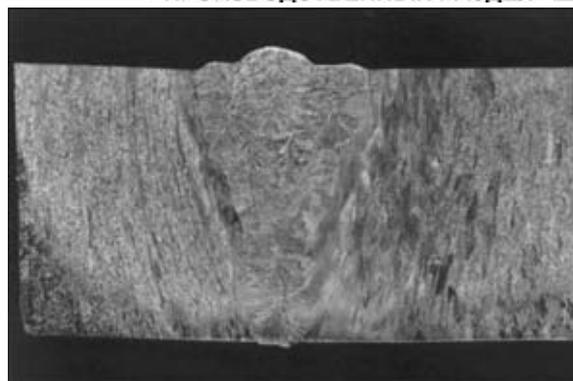


Рис. 6. Макрошлиф сварного соединения толщиной 60 мм, выполненного многопроходной сваркой плавящимся электродом под флюсом

космосе и проходил опробование в условиях невесомости [3].

Для автоматической сварки радиальных стыков сфер из листов титановых сплавов толщиной  $b = 30...130$  мм разработана технология вертикальной сварки плавящимся электродом в аргоне в целевую разделку с горизонтальным расположением сварочной ванны и оборудование для ее реализации. При этом заполнение разделки осуществляли за один проход с колебательным перемещением сварочного мундштука по толщине изделия. Разработанные технология и оборудование обеспечивают высокое качество сварных швов, снижение трудоемкости сварки и расхода сварочной проволоки на 10... 15 % [22].

Для соединения листов титановых сплавов толщиной  $b = 2,5...40,0$  мм в ИЭС им. Е. О. Патона создана технология сварки плавящимся электродом под бескислородными галоидными флюсами сухой грануляции серии АНТ. Сварку под флюсом стыковых, угловых и нахлесточных швов выполняют на постоянном токе обратной полярности. Сварку стыковых швов листового титана осуществляют на медной подкладке, на флюсовой подушке, а также на остающейся подкладке  $b \leq 3$  мм. Листы металла при  $b \leq 10...12$  мм сваривают однопроходными швами без разделки кромок, а при  $b \geq 20...25$  мм — многопроходными швами. Для улучшения формирования швов сварку выполняют в разделку с углом раскрытия  $90^\circ$  и притуплением 3... 5 мм (рис. 6) [3, 4]. Техника автоматической сварки титана под флюсом практически не отличается от используемой для сварки сталей. Шов очищают от шлаковой корки после остывания всех его участков до  $300...350^\circ\text{C}$ . Металл швов, выполненных плавящимся электродом под флюсом, характеризуется удовлетворительными механическими свойствами, высокой плотностью и отсутствием пор.

Для сварки листов титана толщиной  $b \geq 40$  мм в ИЭС им. Е. О. Патона разработан способ электрошлаковой сварки (ЭШС). В связи с высоким электрическим сопротивлением титана при сварке этим способом используют электроды большого сечения ( $D_{\text{пр}} \leq 5$  мм) — пластинчатые и проволочные, а также плавящиеся мундштуки. Для ЭШС применяют тугоплавкие бескислородные флюсы (типы АН-Т2), а поверхность шлаковой ванны защищают аргоном [3, 4, 23, 24].

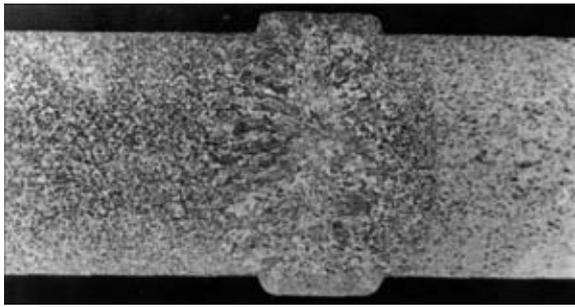


Рис. 7. Макрошлиф стыкового сварного соединения сплава ВТ1-0 толщиной 60 мм, выполненного ЭШС пластинчатым электродом

При сварке пластинчатым электродом ( $b \leq 350$  мм) формирование швов осуществляется с помощью разъемных медных кокилей, охлаждаемых водой. ЭШС одной или двумя электродными проволоками используется для соединения листов титана при  $b = 30 \dots 110$  мм. Для соединения крупногабаритных изделий из сплавов титана разработан процесс ЭШС плавящимся мундштуком и соответствующее оборудование. Выбор оптимальных параметров режимов сварки, обеспечивающих допустимую энергию процесса, позволяет получить швы с хорошим формированием (рис. 7).

При ЭШС  $\alpha$ - и псевдо- $\alpha$ -сплавов, а также низколегированных ( $\alpha + \beta$ )-сплавов титана удается получать сварные соединения с удовлетворительными механическими свойствами при использовании электродов (пластин, плавящихся мундштуков, электродных проволок) того же состава, что и ОМ, несмотря на крупнокристаллическую мартенситоподобную структуру металла швов. При ЭШС высокопрочных двухфазных ( $\alpha + \beta$ )-сплавов электродами, близкими по составу к ОМ, получить необходимые механические свойства сварных соединений не всегда удается, особенно при необходимости подвергать сварные соединения упрочняющей термической обработке. В этом случае следует изыскать оптимальный состав металла шва, отличный от состава ОМ. Наиболее перспективным способом измельчения крупнокристаллической структуры наплавленного металла является воздействие на сварочную ванну внешнего магнитного поля.

Среди способов сварки плавлением все большее место занимают лучевые способы. Для соединений титана наибольшее применение нашла электрон-

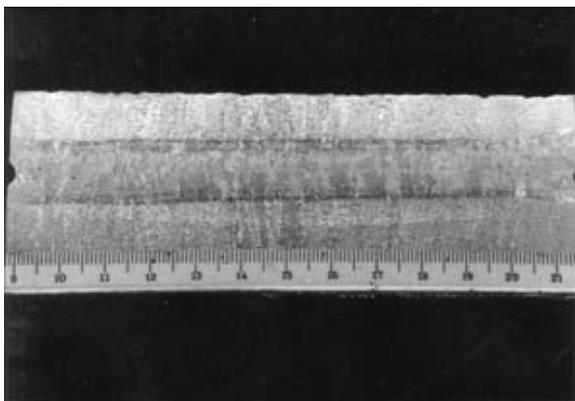


Рис. 8. Макрошлиф стыкового сварного соединения сплава ВТ6 толщиной 120 мм, выполненного ЭЛС горизонтальным лучом

но-лучевая сварка (ЭЛС) [3–5, 8]. ЭЛС титана осуществляют в вакууме (при давлении остаточных газов от  $1 \cdot 10^{-3}$  до 1 Па), что создает экологически чистые условия производства, высокий уровень комфортности эксплуатации оборудования, однако требует высокой степени механизации и автоматизации всех операций. Высокая концентрация энергии в электронном пучке (наибольшая плотность мощности  $5 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>), локальность нагрева металла (наименьшая плотность поперечного сечения  $1 \cdot 10^{-4}$  см<sup>2</sup>), минимальная деформация свариваемого металла, вакуумная защита зоны сварки и остывающих участков шва, дистанционность ведения технологического процесса, точная управляемость пространственно-энергетическими параметрами электронного луча, высокий КПД и низкие эксплуатационные расходы (при значительных первоначальных капитальных вложениях), а также хорошие механические свойства сварных соединений, выполненных способом ЭЛС, определяют ее конкурентоспособность и перспективность. При ЭЛС титана для получения качественных швов требуется более высокая точность сборки изделий под сварку по сравнению с дуговыми процессами сварки плавлением, а также строгое соблюдение допустимых размеров зазора между кромками. Поэтому в ряде случаев ЭЛС выполняют по утолщенным кромкам, которые после окончания процесса сварки убирают с помощью механической обработки.

ЭЛС титана характеризуется глубоким проплавлением при низких значениях погонной энергии. Минимальная зона расплавления при ЭЛС приводит к значительному уменьшению деформации изделий по сравнению с другими способами сварки плавлением. При ЭЛС титана можно выполнять швы принципиально новых видов, например, соединение элементов конструкций, расположенных на разной высоте, сварку в щелях, а также прорезные швы, при которых непосредственному воздействию источника нагрева доступен верхний элемент. ЭЛС изделий из титана осуществляют в нижнем положении, а также горизонтальным лучом со сквозным проплавлением. При этом шов может выполняться на горизонтальной или вертикальной плоскостях. Горизонтальное расположение сварочной ванны обеспечивает получение качественного формирования швов с практически параллельными границами на листах сплава титана при  $b \geq 100 \dots 150$  мм (рис. 8).

$\alpha$ - и псевдо- $\alpha$ -сплавы титана, а также сплавы со стабильной  $\beta$ -структурой характеризуются хорошей свариваемостью способом ЭЛС. Термический цикл ЭЛС обеспечивает сварным соединениям высокие показатели пластичности и вязкости. Сварные соединения ( $\alpha + \beta$ )-сплавов титана, полученные способом ЭЛС, отличаются удовлетворительными механическими свойствами. При ЭЛС сплавов наиболее распространенным дефектом сварных соединений является пористость — главная причина усталостного разрушения сварных изделий.

В последние годы для сварки титана и его сплавов нашла применение лазерная сварка [25–

28]. Лазерное излучение обеспечивает высокую концентрацию энергии, в чем существенно превосходит другие источники энергии, используемые для сварки (наименьшая площадь поперечности сечения лазерного луча  $1 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2$ , наибольшая плотность мощности  $1 \cdot 10^9 \text{ Вт/см}^2$ ). При лазерной сварке (ЛС) титана в отличие от ЭЛС не требуется вакуумных камер. Процесс ЛС осуществляется в защитных газах — аргоне и гелии, поэтому она применима для соединения элементов конструкций любых габаритов. Особенностью лазерного излучения является простота его транспортировки — с помощью зеркальных оптических систем оно может быть направлено в труднодоступные места, подано на значительные расстояния без потерь энергии, одновременно или последовательно использовано в нескольких рабочих местах. Такие особенности лазерного излучения создают возможность легкого и оперативного управления процессом ЛС. К тому же на лазерный луч не оказывают влияния магнитные поля технологической оснастки. Это позволяет получить качественное формирование сварного шва по всей его длине.

Для сварки листов титана толщиной от 0,2 до 25,0 мм нашли применение твердотельные и газовые лазеры в режимах импульсно-периодического и непрерывного действия. Процессы автоматической и ручной ЛС малых толщин осуществляются как в непрерывном, так и в импульсном режимах (шовная и точечная сварка). Способ сварки ЛС с глубоким проплавлением выполняется только в автоматическом режиме. При сварке титана особенно заметны преимущества ЛС с глубоким проплавлением. Сравнение ЭЛС и ЛС по технологическим и экономическим характеристикам показало, что для сварки листов металла при  $b \leq 5 \text{ мм}$  (мощность излучения до 4 кВт) предпочтительнее способ ЛС, а для сварки листов титана при  $b \geq 10 \text{ мм}$  (мощность излучения более 10 кВт) экономически выгоднее ЭЛС. Способ ЛС требует точности направления и стабильности воздействия лазерного излучения. Сварные швы, выполненные способом ЛС, отличаются высоким качеством, что в большинстве случаев исключает их последующую обработку. Механические свойства сварных соединений титана, выполненных ЛС, находятся на уровне свойств ОМ. К недостаткам ЛС относится высокая стоимость источников лазерного излучения. Существенной проблемой, возникающей при ЛС титана, является образование пор в корневой части шва вследствие резкого изменения уровня растворимости газов при быстром охлаждении и затвердевании металла.

Для ионно-лучевой сварки титана в вакууме с управляемым выделением из шва газов (кислорода, азота) предложено использовать плотные ионные потоки. С помощью электронно-ионной сварки возможно легирование металла шва. Однако эти способы сварки в настоящее время не нашли практического применения [29, 30] так же, как и способ сварки световым лучом [31].

Создание сварных конструкций с высокими техническими и экономическими показателями всегда

связано с необходимостью выбора способа сварки, наиболее соответствующего конкретным условиям производства и эксплуатации изготавливаемых изделий. Правильный выбор способа сварки обуславливает качество и эффективность выполнения конкретных сварных соединений, что впоследствии сказывается на техническом уровне производства сварных изделий, а также их работоспособности и долговечности. Современные способы сварки плавлением позволяют успешно соединять листы титана толщиной от долей миллиметра (лазерная и микроплазменная) до десятков сантиметров и более (ЭЛС и ЭШС).

Для выбора технологии сварки или ее усовершенствования разработаны и нашли применение в промышленности несколько версий функционально-стоимостного анализа (ФСА), под которым подразумевается метод системного исследования объекта (изделия, процесса, структуры), направленный на выявление и использование резервов совершенствования. Главное исходное положение ФСА — в каждом объекте имеются функционально-избыточные затраты, которые можно выявить, устранить или использовать более эффективно [32].

1. Горькин И. В., Гечулин Б. Б. Титан в машиностроении. — М.: Машиностроение, 1990. — 400 с.
2. Изготовление и эксплуатация оборудования из титана / Г. М. Шеленков, В. Е. Блащук, Р. К. Мелехов и др. — Киев: Техника, 1984. — 120 с.
3. 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.
4. Гуревич С. М. Справочник по сварке цветных металлов. — Киев: Наук. думка, 1990. — 512 с.
5. Zamkov V. N., Prilutskii V. P., Shevelev A. D. Metallurgy and technology of welding titanium alloys // Welding and Surfacing Reviews. — 1992. — Vol. 2. — P. 1–39.
6. Штамповка, сварка, пайка и термообработка титана и его сплавов в авиастроении / Под ред. А. Г. Братухина. — М.: Машиностроение, 1997. — 600 с.
7. American Welding Society: Welding handbook. — Miami: American Welding Society, 1998. — Vol. 4. — 621 p.
8. Электронно-лучевая сварка / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко и др. / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.
9. Specialized gas shielding for titanium // Welding J. — 2000. — № 3. — P. 56.
10. Сварка погруженным вольфрамовым электродом сплава ВТ20 по необработанным кромкам / Б. И. Долотов, В. И. Муравьев, Ю. Л. Иванов, Б. Н. Марьин // Свароч. пр-во. — 1997. — № 7. — С. 25–27.
11. Сварка с электромагнитным перемешиванием / В. П. Черныш, В. Д. Кузнецов, А. Н. Брисман, Г. М. Шеленков. — Киев: Техника, 1983. — 127 с.
12. Замков В. Н., Топольский В. Ф., Куширченко Н. А. Двухдуговая сварка толстолистового титана вольфрамовыми электродами // Автомат. сварка. — 1978. — № 2. — С. 44–47.
13. Белоус В. Ю. Дуговая сварка в узкий зазор титановых сплавов (Обзор) // Автомат. сварка. — 2002. — № 9. — С. 39–43.
14. 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.
15. Царюк А. К. Сварка труб с трубными досками (Обзор) // Автомат. сварка. — 1998. — № 4. — С. 25–29.
16. Никитин В. Б., Степанов В. И. Изготовление теплообменного аппарата с использованием титановых сплавов для ТЭС «Альхольма» // Технология машиностроения. — 2001. — № 2. — С. 53–57.
17. Customized orbital welding meets the challenge of titanium welding // Welding J. — 1996. — № 12. — P. 39–41.
18. Царюк А. К. Оборудование для сварки труб с трубными досками // Сварщик. — 2000. — № 4. — С. 12–13.



19. Плазменная сварка титановых сплавов / В. Е. Блащук, Л. М. Оноприенко, Г. М. Шеленков и др. // Автомат. сварка. — 1993. — № 3. — С. 31–33.
20. Микроплазменная сварка / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Наук. думка, 1979. — 248 с.
21. Неровный В. М. Дуговая сварка в вакууме титановых сплавов // Технология машиностроения. — 2001. — № 2. — С. 27–30.
22. Горбач В. Д., Хвалынский В. Н. Новые технологии изготовления несущих сферических конструкций изделий морской техники // Свароч. пр-во. — 2002. — № 7. — С. 28–33.
23. Замков В. Н., Лычко И. И., Топольский В. Ф. ЭПС плит из титанового сплава Grade 5 // Автомат. сварка. — 1999. — № 9. — С. 73–75.
24. Yushchenko K. A., Lychko I. I., Sushchuk-Slyusarenko I. I. Effective techniques of electroslag welding and prospects for their application in welding production. — 1999. — Vol. 12. — 108 p. — (Welding and Surfacing Reviews).
25. Gedopt J., Delarbre E. Pulsed Nd: YAG laser welding of titanium EAR implants // Laser technologies in welding and materials processing: Proc. of Intern. conf., May 19–23, 2003, Katsiveli, Ukraine. — Kiev: E. O. Paton Electric Welding Institute, 2003. — P. 209–210.
26. Гагрилюк В. С., Жилкин А. М., Иванов Н. Л. Лазерная обработка материалов // Технология металлов. — 2000. — № 5. — С. 32–44.
27. Abbott D. H., Arcella F. G. Laser forming titanium components // Advanced Materials and Processes. — 1998. — 153, № 5. — P. 29–30.
28. Лазерная обработка материалов / М. М. Пронин, В. Н. Старцев, В. О. Попов и др. // Вопр. материаловедения. — 1999. — № 3. — С. 375–393.
29. Ионнолучевая сварка титанового сплава ВТ6 / М. Д. Габович, М. Н. Проценко, В. Я. Порицкий и др. // Автомат. сварка. — 1980. — № 2. — С. 69–70.
30. Габович М. Д., Хомич В. А., Назаренко О. К. Электронно-ионнолучевая сварка с легированием шва // Там же. — 1993. — № 10. — С. 49–50.
31. Разработка и развитие технологии сварки, пайки и термической обработки световым лучом / В. А. Фролов, Н. С. Пронин, С. А. Федоров, М. И. Опарин // Свароч. пр-во. — 2003. — № 11. — С. 19–21.
32. Демчишев П. Г., Марьин С. Б. Экспресс-ФСА процесса сварки погруженным вольфрамовым электродом // Сварка в Сибири. — 2004. — № 1. — С. 31–34.

A review has been made of practical application of various processes of fusion welding of titanium and its alloys. Recommendations are given on application of the welding processes, and their advantages and disadvantages are noted.

Поступила в редакцию 15.05.2004,  
в окончательном варианте 06.09.2004

## ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ ДВИГАТЕЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ

В ИЭС им. Е.О. Патона разработан технологический процесс электродуговой наплавки коленчатых валов карбюраторных и дизельных двигателей автомобилей.

Целью разработки является восстановление рабочего ресурса коленчатых валов, вышедших из строя по причине износа рабочих поверхностей (коренных и шатунных шеек, поверхности под сальники, хвостовиков и фланцев), и возвращение их в эксплуатацию.



Технологический процесс восстановления состоит из следующих основных операций: предварительная термообработка для снятия усталостных напряжений, электродуговая наплавка изношенных рабочих поверхностей, повторная термообработка для снижения сварочных напряжений, механическая обработка (шлифование) наплавленных поверхностей до номинальных размеров.

В зависимости от химического состава металла коленчатого вала и типа двигателя автомобиля в качестве наплавочных материалов используют различные марки порошковых проволок и флюсов, разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона. Основными технологическими приемами производства наплавки являются широкоослойная наплавка с колебаниями порошковой проволоки на всю ширину наплавляемой поверхности и наплавка по винтовой линии порошковой проволокой под флюсом.

03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11  
ИЭС им. Е. О. Патона, отд. № 23  
Тел.: (38044) 227 61 57; 261 51 18