

## АРГОНОДУГОВАЯ СВАРКА ТИТАНА И ЕГО СПЛАВОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФЛЮСОВ (ОБЗОР)

С. В. АХОНИН, В. Ю. БЕЛОУС

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В ИЭС им. Е.О. Патона в 1950–1980 гг. были заложены научные основы разработки флюсов для сварки и плавки титана и титановых сплавов. Разработана технология автоматической сварки титана плавящимся электродом с применением бескислородных флюсов. Разработаны способ аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом по слою флюса (TIG-F) и вольфрамовым электродом с применением присадочной титановой порошковой проволоки (TIG-FW). Эти способы расширяют технологические возможности дуговой сварки вольфрамовым электродом, обеспечивают высокое качество сварных соединений титана и гарантируют отсутствие пор в сварных швах. Библиогр. 17, табл. 4, рис. 9.

*Ключевые слова:* автоматическая дуговая сварка, аргонодуговая сварка, титановые сплавы, плавящийся электрод, неплавящийся электрод, бескислородные флюсы, порошковая проволока

Сложность технологических процессов сварки титана обусловлена, в первую очередь, его высокой химической активностью. При сварке титан активно поглощает газы из окружающей среды, что приводит к существенному снижению пластических характеристик шва. Кроме того, в металле шва возможно образование пор, что резко снижает усталостные характеристики сварных соединений.

Одним из основоположников проводимых в ИЭС им. Е. О. Патона работ по решению проблем сварки титана, а также химически активных, тугоплавких и цветных металлов, является профессор С. М. Гуревич. Многолетняя работа руководимого им научно-исследовательского коллектива позволила решить для нашей страны задачу получения качественных сварных швов титана и титановых сплавов. Благодаря детальным исследованиям, проведенным под руководством проф. С. М. Гуревича, были заложены научные основы для разработки бескислородных флюсов и разработаны флюсы для сварки титана. В результате в настоящее время для создания сварных соединений из титана стало возможным применение практически всех известных методов сварки плавлением, таких как плавящимся электродом под флюсом, вольфрамовым электродом, электрошлаковая, электронно-лучевая, а также сварка в твердом состоянии.

**Автоматическая сварка титана плавящимся электродом с применением бескислородных флюсов.** Сварка плавящимся электродом под флюсом, занимающая по объемам и масштабам промышленного применения одно из ведущих мест в современной индустрии, имеет ряд существенных особенностей по сравнению с другими способами. Прежде всего это наличие оболочки расплавленного флюса, покрывающего зону свар-

ки и защищающего ее от вредного влияния газов атмосферы. При этом происходит взаимодействие металла и флюса — шлака и протекают металлургические реакции, которые могут привести к обогащению шва примесями.

Как известно, флюсы, применяющиеся для сварки сталей, обладают по отношению к железу различными окислительными свойствами. Исследования, проведенные в 1950-х годах в нашей стране и за рубежом показали, что при сварке титана даже под низкремнистыми, условно называемыми основными, флюсами, характеризующимися наименьшей окислительной способностью, происходит интенсивное насыщение металла шва кислородом, вследствие чего соединение получается хрупким [1].

В результате в начальный период промышленного применения титана как конструкционного материала некоторые зарубежные исследователи даже отрицали принципиальную возможность использования для титана сварки под флюсом, поскольку в то время металлургам не удалось подобрать материал, который не реагировал бы с ним и не загрязнял его кислородом [2].

Теоретические исследования, подтвержденные опытными работами в ИЭС им. Е. О. Патона под руководством профессора С. М. Гуревича, позволили опровергнуть это ошибочное мнение. Была доказана возможность сварки титана под специальными тугоплавкими флюсами, разработаны принципы построения и созданы новые системы галоидных бескислородных флюсов [3].

Анализ металлургических и технологических особенностей сварки титана позволил установить особые требования, которым должны соответствовать созданные системы флюсов. Главное из них, это полное отсутствие оксидов. Было установлено, что наличие во флюсе даже таких стойких ок-

сидов, как  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ ,  $TiO_2$  не исключает окисления металла шва (рис. 1). Только полное удаление из флюса оксидов обеспечивает в наплавленном металле содержание кислорода менее 0,1 %.

Исследования, проведенные под руководством проф. С. М. Гуревича, показали, что бескислородные флюсы для сварки титана и его сплавов, отвечающие указанным требованиям, можно создать, применяя в качестве компонентов фториды и хлориды щелочных и щелочноземельных металлов [4]. К числу важнейших металлургических особенностей сварки титана под флюсом необходимо в первую очередь отнести взаимодействие металла сварочной ванны с флюсом. Термодинамические расчеты, а также результаты некоторых прямых исследований показали, что возможны реакции двух типов: реакция титана с компонентами флюса и реакция оксидов титана с флюсом. Термодинамические расчеты, исследования шлаковой корки и наплавленного металла позволили сформулировать требования к флюсам для сварки титановых сплавов:

- для наиболее полного взаимодействия флюса с титаном и его оксидами в составе флюса желательно иметь максимальное количество фторидов и минимальное хлоридов;

- в качестве компонентов флюса больше всего подходят фториды, характеризующиеся наибольшей способностью реагировать с оксидами титана.

Лучшие результаты были получены при использовании в качестве основы флюса  $CaF_2$ . Важное свойство этого тугоплавкого фторида — его способность интенсивно взаимодействовать с водяным паром с образованием фтористого водорода, присутствие которого в зоне дуги установлено экспериментально. Термодинамические расчеты показывают возможность протекания реакции между  $CaF_2$  и водяным паром при температурах выше 2000 °С. Возможность удаления абсорбированной влаги из зоны сварки и благодаря этому защита металла шва от насыщения водородом и кислородом является важной особенностью сварки титана под флюсом на основе  $CaF_2$ , что является одной из причин полного отсутствия пористости в швах, выполненных плавящимся электродом под фторидными флюсами.

Выбор оптимальных составов флюсов на основе  $CaF_2$  является сложной задачей в связи с тем, что с более легкоплавкими хлоридами образуются многочисленные эвтектики, а области концентраций расплавов, характеризующихся достаточно высокой температурой плавления, весьма ограничены. На основе исследований, проведенных в ИЭС им. Е. О. Патона, разработан

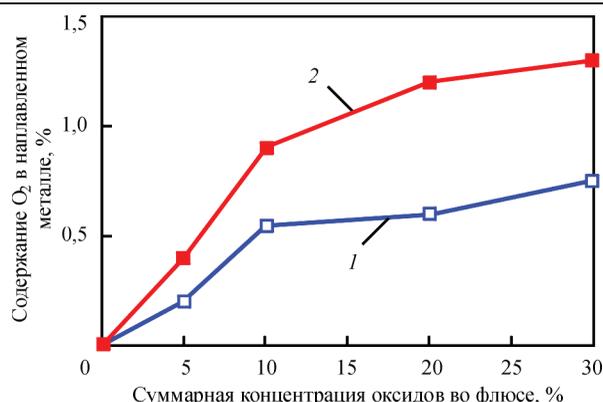


Рис. 1. Содержание кислорода в наплавленном слое в зависимости от концентрации некоторых оксидов во флюсе: 1 —  $Al_2O_3$ ; 2 —  $SiO_2$

ряд бескислородных галогенидных флюсов серии АНТ, таких как АНТ-1, АНТ-3, АНТ-7, предназначенных для сварки плавящимся электродом титана и его сплавов [3, 5]. Созданные флюсы в процессе сварки надежно изолируют ванну расплавленного металла и остывающие участки шва и ЗТВ от вредного контакта с газами воздуха, о чем свидетельствуют результаты анализа содержания газов в металле шва технического титана (табл. 1). Чтобы содержание примесей в металле шва было на уровне их концентрации в ОМ, необходимо применять флюс с содержанием влаги не более 0,05 %. Гранулометрический состав флюса от 0,3 до 1,5 мм. Исследования показали, что швы, сваренные под флюсом, не имеют пор, шлаковых включений, трещин и других дефектов.

Технологические свойства флюсов серии АНТ, предназначенных для автоматической сварки титана плавящимся электродом (стабильность процесса, хорошее формирование шва и др.), во многом зависят от чистоты  $CaF_2$ . Установлено, что причиной ухудшения свойств флюса является содержание во флюсе  $CaO$ , количество которого не должно превышать 0,5 %. С целью обеспечения максимальной чистоты флюсов, в первую очередь по содержанию оксидов, для их изготовления используются химически чистые реактивы, не допускается применение минералов и технически чистых компонентов.

Создание сварочных материалов для дуговой сварки под флюсом титана послужило также основой для разработки флюсов и технологии электрошлаковой сварки и плавки титана [6].

Технология автоматической сварки титана плавящимся электродом под бескислородными флю-

Таблица 1. Содержание основных примесей в металле швов сварных соединений титана ВТ1-00, выполненных под флюсом АНТ-1

Толщина металла $b$ , мм	Содержание, % (ОМ/металл шва)			
	$N_2$	$O_2$	$H_2$	C
2,0	0,029/0,025	0,085/0,085	0,008/0,007	0,07/0,05
4,5	0,037/0,030	0,078/0,077	0,004/0,005	0,06/0,04

Таблица 2. Механические свойства сварных соединений (ВТ1-0), выполненных с флюсогазовой защитой и с защитой в камере с контролируемой атмосферой

Способ защиты сварочной ванны	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{в'}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$a_{ц}$ , Дж/см <sup>2</sup>
Флюсогазовая	315	407	28,6	61,3	83
Инертным газом	310	402	30,2	62,8	81

сами разработана в ИЭС им. Е. О. Патона под руководством проф. С. М. Гуревича [7]. Этим способом сварки на титане можно выполнять все основные типы швов: стыковые, угловые, тавровые, нахлесточные при толщине соединяемых элементов от 3 до 40 мм.

Весьма существенная особенность автоматической сварки титана под флюсом — необходимость выполнения процесса при минимально допустимом расстоянии между поверхностью свариваемого металла и нижней точкой мундштука — сухом вылете электродной проволоки. Это обусловлено тем, что титан имеет очень высокие удельное электросопротивление и увеличение сухого вылета приводит к чрезмерному разогреву электродной проволоки, насыщению ее вредными газовыми примесями, нарушению стабильности процесса сварки и, как следствие, к ухудшению механических свойств и качества формирования шва. Сварка выполняется на постоянном токе обратной полярности. Сварка на прямой полярности и переменном токе резко ухудшает качество формирования шва. Применимы сварочные проволоки диаметром 2,5; 3,0; 4,0 и 5,0 мм. Применение проволок большего диаметра затруднено вследствие их повышенной жесткости. Для сварки технического титана ВТ 1-00 и ВТ 1-0 и низколегированных сплавов ОТ4, ОТ4-0, ОТ4-1, ВТ5, ВТ5-1, 4200 используется сварочная проволока марок ВТ1-00св. Для сварки средне- и высоколегированных сплавов (например, ВТ6С, ВТ14, ВТ20 и др.) применяют проволоки марок СПТ2, ВТ20св и др. Сварку сплавов типа ПТ-3В, ПТ-7М рекомендуется выполнять проволокой 2В.

Сварку продольных швов на металле небольшой толщины (3...6 мм), а также многослойные швы на металле средней толщины рекомендуется выполнять на малых токах под флюсом АНТ-1. Для сварки кольцевых швов малой толщины на титане и всех однопроходных швов средней толщины применяется флюс АНТ-3. Флюсы АНТ-5 и АНТ-7 предназначены для соединения металла больших толщин при сварке на токах, превышающих 700 А.

Сравнение результатов испытаний металла швов, выполненных автоматической сваркой под флюсом и неплавящимся вольфрамовым электродом в камере с атмосферой аргона, показало, что прочностные и пластические характеристики в обоих случаях практически равнозначны. Одна-

ко вязкость швов, сваренных под флюсом, хотя и находится на достаточно высоком уровне, уступает соответствующим показателям швов, выполненных вольфрамовым электродом в аргоне. Так, ударная вязкость  $KCU$  металла шва сплава ВТ5-1, сваренного автоматической сваркой под флюсом, составляет 48 Дж/см<sup>2</sup>, при этом ударная вязкость металла шва сплава ВТ5-1, выполненного сваркой вольфрамовым электродом в среде аргона, имеет ударную вязкость  $KCU = 62$  Дж/см<sup>2</sup>.

Для сварки конструкций особо ответственного назначения был разработан комбинированный флюсогазовый способ защиты сварочной ванны в процессе автоматической сварки плавящимся электродом [8]. Сущность его заключается в том, что в бункере специальной конструкции при подаче флюса в зону сварки производится продувка флюса аргоном. В результате вытеснения воздуха, находящегося между гранулами флюса, аргоном полностью исключается попадание азота и кислорода в сварочную ванну. Механические свойства металла шва, выполненного плавящимся электродом с флюсогазовой защитой, и сваренного вольфрамовым электродом в камере с инертной атмосферой аргона, были одинаковы (табл. 2). Расход аргона, необходимого для продувки флюса в бункере, составляет 3...4 л/мин.

Стыковые соединения толщиной до 10 мм можно успешно сваривать с одной стороны. Стыковые соединения толщиной 10...16 мм целесообразно выполнять двухсторонней сваркой на медной водоохлаждаемой подкладке с защитой инертным газом обратной стороны стыка. Для лучшего проплавления стыка и качества формирования шва на свариваемых кромках целесообразно выполнять X-образную разделку. При этом наиболее технологичной является разделка кромок с углом раскрытия 90°. В этом случае обеспечивается высокая стабильность процесса сварки, хорошая отделимость шлаковой корки, а также увеличивается глубина проплавления. На основании экспериментальных данных установлена зависимость значения сварочного тока от скорости подачи электродной проволоки (рис. 2).

Автоматическую сварку под флюсом титановых изделий толщиной свыше 16...18 мм выполняют в разделку кромок путем наложения нескольких слоев. Перед сваркой каждого последующего слоя необходимо тщательно зачищать поверхность предыдущего шва. Сократить количество операций по зачистке швов можно за счет применения сварки двумя дугами, расположенными одна за другой и смещенными на некоторое расстояние поперек оси шва. Этот метод позволяет получить швы с большим коэффициентом заполнения разделки кромок, плавным переходом

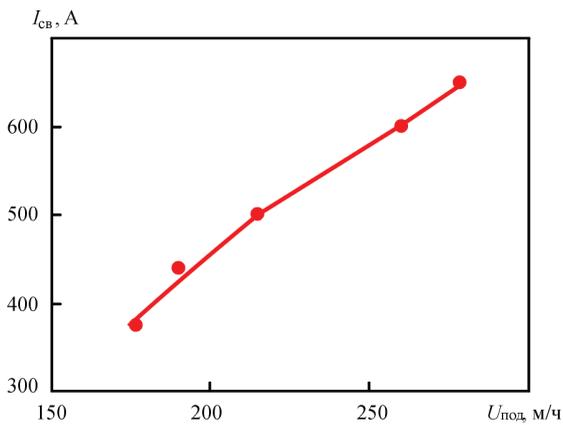


Рис. 2. Зависимость значения сварочного тока от скорости подачи электродной проволоки при автоматической сварке под флюсом титана

от ОМ к усилению шва и высокими показателями прочности и пластичности (табл. 3). Данный метод эффективен также при сварке угловых, тавровых и нахлесточных соединений [1].

**Аргонодуговая сварка титана вольфрамовым электродом с применением бескислородных флюсов.** Как показал опыт применения автоматической сварки титана плавящимся электродом под бескислородными фторидно-хлоридными флюсами, выполненные швы отличаются высокой плотностью и поры в них отсутствуют. На это обратили внимание авторы работ [9, 10], изучавшие методы борьбы с пористостью, возникающей при аргонодуговой сварке титана неплавящимся электродом. Они экспериментально показали, что положительное влияние фторидов на плотность швов сохраняется и при сварке в инертной атмосфере. Так, впервые для аргонодуговой сварки титана появился радикальный способ предупреждения пористости швов металлургическим путем — сварка с активирующим реагентом  $CaF_2$ . В дальнейшем были созданы более эффективные и технологичные флюсы для сварки титана и его сплавов вольфрамовым электродом. Кроме того, как оказалось, галогениды щелочных и щелочноземельных металлов при попадании в зону дуги контрагируют дугу и изменяют характер проплавления металла и формирования швов. При движении дуги вдоль стыка в момент ее перехода с поверхности металла, не покрытой флюсом, на слой галогенида визуально отмечается сжатие дуги и изменение ее цвета, дуга погружается вглубь металла; ширина шва уменьшается.

Таблица 3. Механические свойства сварных соединений, выполненных с автоматической двухдуговой сваркой под флюсом АНТ-7\*

Марка сплава	$b, мм$	$\sigma_{0,2}, МПа$	$\sigma_B, МПа$	$\delta, \%$	$\Psi, \%$	$a_n, Дж/см^2$
ПТ-3В	25	676/617	727/677	20,2/19,5	39,6/36,2	68/62
ОТ4	32	694/661	769/739	23,2/22,3	38,1/35,3	96/88

\*Электродная проволока ВТ1-0.

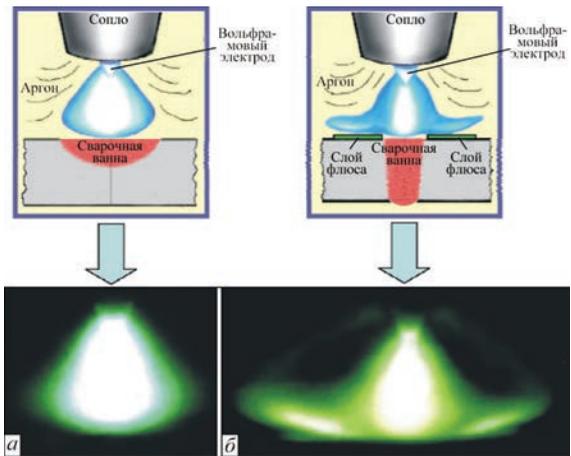


Рис. 3. Схема и фотография дуги баз флюса (а) и с флюсом (б)

В ИЭС им. Е. О. Патона проведены исследования влияния на процесс сварки вольфрамовым электродом фторидов щелочных и щелочноземельных металлов, таких, например, как  $LiF, CaF_2, SrF_2, BaF_2, KF, RbF, CsF, NaF, MgF_2$  и др., исследованы двойные и тройные фторидные системы и в результате разработаны флюсы АНТ-17, АНТ-23 и АНТ-25, предназначенные для автоматической аргонодуговой сварки титана вольфрамовым электродом. Разработан способ аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом по слою флюса (TIG-F) [1, 11] и с присадочной титановой порошковой проволокой (TIG-FW) [11, 12]. В обоих случаях защитная роль флюса второстепенна. Его главная функция — повышение технологических возможностей дуги. Глубокое проплавление металла, узкие швы, небольшая протяженность зоны термического влияния, относительно низкая погонная энергия и, как следствие, уменьшение остаточных сварочных деформаций — вот неполный перечень преимуществ процесса сварки TIG-F (рис. 3).

Добавление флюса в зону горения дуги при аргонодуговой сварке приводит к изменению пространственных характеристик и электрических параметров дуги. В частности, к сжатию столба дуги и увеличению плотности тока на аноде (рис. 4), и, как следствие, позволяет влиять на параметры сварных швов и, в первую очередь, на увеличение глубины проплавления [12, 13].

Наблюдаемые физические явления в дуге, зависящие, в первую очередь, от состава флюса, определяют и технологические преимущества сварки TIG-F и TIG-FW по сравнению со сваркой методом TIG. При неизменном значении сварочного тока и скорости сварки применение флюса значительно увеличивает глубину провара, уменьшает ширину швов, а также снижает погонную энергию (рис. 5). Однако при повышении тока свыше 200 А наносимого количе-

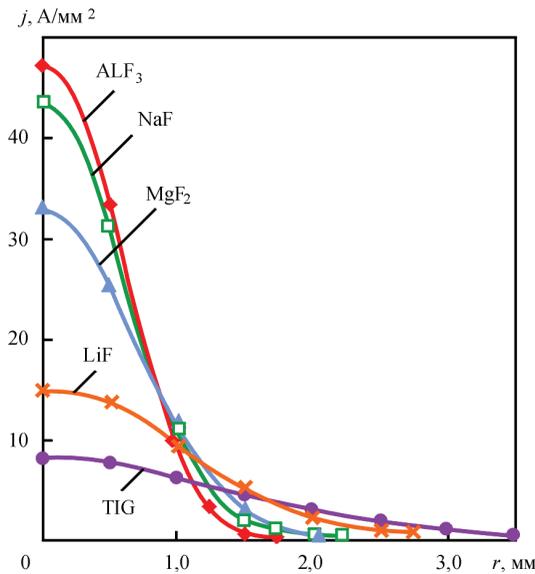


Рис. 4. Радиальное распределение плотности тока в анодном пятне при сварке титана с различными фторидами ( $I_{св} = 100 \text{ A}$ ;  $v_{св} = 10 \text{ м/ч}$ )

ства флюса становится уже недостаточно и эффективность флюса резко падает. Учитывая такую особенность сварки TIG-F, этот способ сварки рекомендуется для выполнения швов на металле толщиной от 0,8 до 6,0 мм [14, 15]. Флюс АНТ-23 предназначен для сварки листов толщиной 0,8...3,0 мм, флюс АНТ-25 — для сварки листов толщиной 3...6 мм за один проход без разделки кромок. Малый объем сварочной ванны позволяет применить однопроходную автоматическую сварку по флюсу АНТ-25 для соединения металла толщиной до 6 мм на вертикальной плоскости.

**Аргонодуговая сварка титана вольфрамовым электродом с применением порошковых**

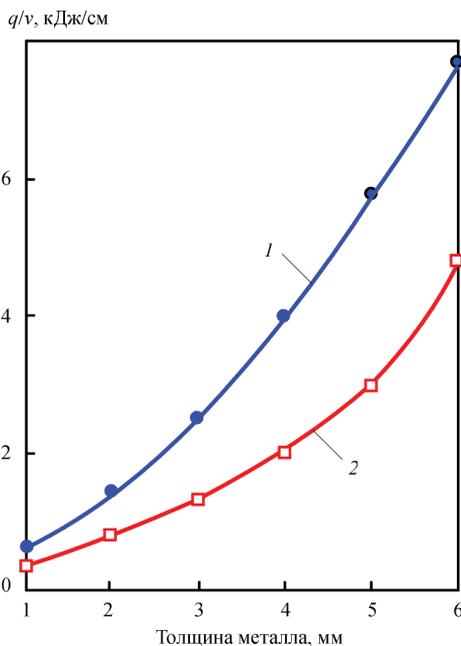


Рис. 5. Зависимость погонной энергии от толщины металла при сварке без флюса (1) и по флюсу (2) (флюсы АНТ-23А и АНТ-25А)

**проволок.** Как уже упоминалось, при повышении тока свыше 200 А предварительно нанесенного на свариваемые кромки количества флюса становится уже недостаточно и эффективность флюса падает. Наибольшее влияние на глубину проплавления оказывает количество флюса, вводимого в дугу, т. е. толщина наносимого слоя, так как большей толщине слоя флюса соответствует большая глубина провара. Поэтому для сварки титана толщиной более 6 мм разработан принципиально новый для титана сварочный материал — присадочная порошковая проволока (рис. 6), и технология сварки титана вольфрамовым электродом с применением порошковой проволоки TIG-FW. В своей основе порошковая проволока представляет собой оболочку из титановой фольги, заполненную флюсовым наполнителем [14, 15]. Разработано два типа порошковой проволоки — ППТ-1 и ППТ-2, отличающиеся как по химическому составу наполнителя, так и по конструкции. Проволоку марки ППТ-1 используют в тех случаях, когда по условиям эксплуатации не требуется усиление швов. Проволока марки ППТ-2, внутри которой находится титановая проволока сплошного сечения, позволяет получать швы с усилением.

Применение присадочной порошковой проволоки позволяет увеличить количество флюса в зоне сварки и благодаря этому метод TIG-FW (рис. 7) позволяет сваривать сплавы титана толщиной 6,0...16,0 мм за один проход без разделки кромок. Порошковая проволока может успешно

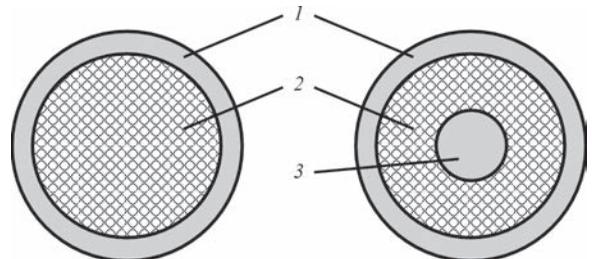


Рис. 6. Поперечное сечение порошковой проволоки: 1 — оболочка; 2 — флюсовый наполнитель; 3 — сердечник

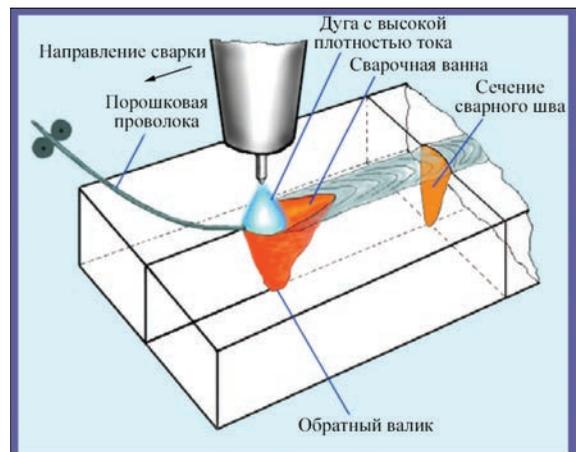


Рис. 7. Схема TIG сварки с порошковой проволокой

Таблица 4. Объемная доля пор в соединениях титана, выполненных различными способами сварки

Способ сварки	Металл	Объемная доля пор $m_p$ , %
Аргонодуговая сварка (TIG)	Основной металл	0
	Шов, полученный при сквозном проплавлении пластины	0,82
	Шов, выполненный по слою флюса АНТ-17А	0,65
	Шов, выполненный по слою флюса АНТ-25А	0,43
Электронно-лучевая сварка (EBW)	Основной металл	0
	Шов, полученный при сквозном проплавлении пластины	1,40
	Стыковой шов	1,34
Электрошлаковая сварка (ESW)	Основной металл	0
	Шов	0,46

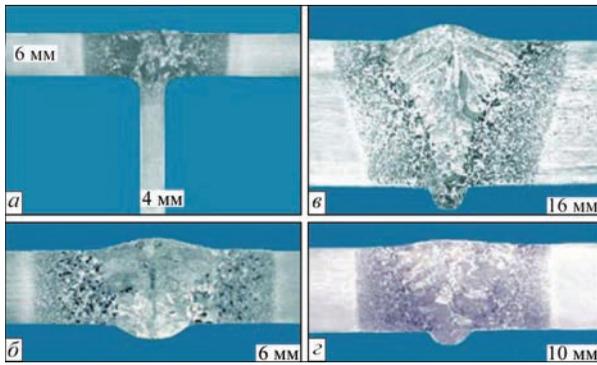


Рис. 8. Макрошлифы сварных соединений, выполненных по флюсу АНТ-25А (а, б); ППТ-2 (в); ППТ-1 (г)

применяться для выполнения не только стыковых, но и тавровых соединений. В качестве примера на рис. 8 представлены макрошлифы сварных соединений различных типов, выполненных TIG-F и TIG-FW методами.

После сварки на поверхности шва остается слой затвердевшего шлака, являющегося дополнительной защитой остывающего металла. Удаление его производится также, как и после сварки по флюсу. Кроме технологических преимуществ применение флюсов и порошковых проволок при аргонодуговой сварке титана существенно влияет на металлургические процессы в сварочной ванне, в частности, предупреждает образование пор в швах. Известно, что пористость является основным типом металлургических дефектов сварных соединений титановых сплавов, выполненных как дуговой, так и лучевыми методами сварки. Наличие пор в швах мало влияет на свойства сварных соединений при статических нагрузках, но существенно снижает их работоспособность в условиях динамических нагрузок, резко уменьшая предел усталости.

Образующиеся в сварном шве дефекты в виде пор существенно снижают сопротивление усталости сварных соединений. Применение же галогенидных флюсов и порошковых проволок позволяет предотвратить образование пор в швах (табл. 4).

Как видно из приведенных данных, объемная доля пор в металле швов, выполненных на техническом титане различными способами сварки плавлением, существенно отличается по величине.

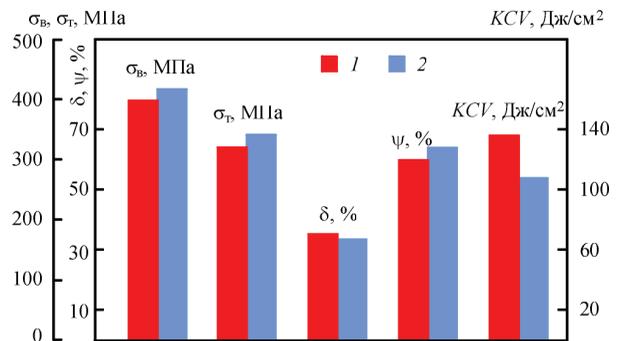


Рис. 9. Механические характеристики сварного соединения нелегированного титана марки Grade 2 (толщина 6 мм): 1 — основной металл; 2 — металл шва

не. Максимальное количество пор имеют швы, выполненные ЭЛС, а минимальную — ЭШС и TIG с применением флюса, что объясняется активным металлургическим взаимодействием флюса с расплавленным металлом сварочной ванны [16].

Исследования показали, что применение флюсов и порошковых проволок при сварке приводит к связыванию водорода в сварочной ванне фтором в гидридофториды типа  $TiF_xH_y$ , остающиеся в металле шва в виде микроскопических шлаковых включений, которые, как показали испытания, не оказывают существенного влияния на механические свойства сварных соединений (рис. 9), выполненные с применением флюсов.

Применение сварки по слою флюса позволяет существенно поднять технико-экономические показатели сварки [17]. Так, например, при сварке титанового листа толщиной 5 мм время сварки, расход сварочной проволоки и аргона снижается более чем на 60 %, а потребление электроэнергии — более чем на 50 %. При этом себестоимость 1 м шва (с учетом дополнительных затрат на флюс) уменьшается почти в два раза.

### Выводы

1. В ИЭС им. Е. О. Патона разработана серия бескислородных флюсов и технология сварки плавлением титана плавящимся электродом с использованием разработанных флюсов для сварки титана и сплавов на его основе.

2. Разработанные флюсы и метод сварки титана вольфрамовым электродом по слою флюса (TIG-F) расширяют технологические возможности сварки вольфрамовым электродом, обеспечивают увеличенную проплавливающую способность дуги, отсутствие пор в сварных швах и высокое качество получаемых соединений.

3. Применение порошковой проволоки и метод сварки титана вольфрамовым электродом TIG-FW позволяет проваривать металл толщиной до 16 мм за один проход и гарантирует отсутствие пор в швах и высокое качество получаемых соединений.

1. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / С. М. Гуревич и др. – К.: Наукова думка, 1986. – 240 с.
2. Hoefer H. W. Fusion welding of titanium in jet engine applications // Hawker-Siddley Techn. Journal. – 1958. – v.1, № 1. – P. 61–64.
3. Гуревич С. М. Флюсы для автоматической сварки титановых сплавов // Авиационная промышленность. – 1961. – № 5. – С. 55–59.
4. Гуревич С. М. Вопросы металлургии сварки титана // Титан и его сплавы. – 1960. – Вып. 3. – С. 127–132.
5. Гуревич С. М. Сварка титана под флюсом // Авиационная промышленность. – 1957. – № 4. – С. 13–16.
6. Гуревич С. М., Дидковский В. П. Технология электрошлаковой сварки поковок из титановых сплавов // Сб: Новые сварочные процессы. – М.: Машиностроение, 1960. – С. 187–191.
7. Гуревич С. М. Технология сварки деталей из титана и его сплавов // Передовой научно-технический и производственный опыт: сб. тр. – К.: Изд-во АН СССР, 1958. – С. 18–25.
8. Гуревич С. М. Некоторые особенности сварки титана под флюсом. // Автоматическая сварка. – 1957. – № 5. – С. 38–48.
9. А. с. 183303 (СССР). Способ аргоно-дуговой сварки титановых сплавов / А. Н. Тимошенко, А. Ф. Пиджарый, А. С. Бессонов; опубл. 1966; Бюл. № 3.
10. Маслюков О. А. Борьба с пористостью при аргонодуговой сварке титановых и других металлов и сплавов // Тезисы докладов всесоюзного совещания по сварке плавлением металлов малых толщин. – К.: Изд-во Координационного совета по сварке ИЭС им. Е. О. Патона, 1965. – С. 49–53.
11. Zamkov V. N., Akhonin S. V. New methods for welding titanium and manufacture of unique large-sized titanium semi-finished products // Paton Welding Journal. – 2001. – № 9. – P. 33–39.12.

12. Contraction of the welding arc caused by the flux in tungsten-electrode argon-arc welding / B. E. Paton et al. // The Paton Welding Journal. – 2000. – № 1. – P. 5–11.
13. Prilutsky V. P., Yeroshenko L. E., Zamkov V. N. Distribution of Vapours of Metals and Welding Consumables in Arc During TIG Welding // Book of Proceedings. The ASM International European Conference on Welding and Joining Science and Technology, 10–12 March 1997, Madrid.
14. Zamkov V. N., Prilutsky V. P., Topolsky V. F. Consumables and Methods of for Welding Titanium for Aerospace Engineering Application // Journal of Advanced Materials. – 2000. – v. 32, № 3. – P. 57–61.
15. Paton B. E., Zamkov V. N., Prilutsky V. P. Le soudage A-TIG du titane et de ses alliages // Soudageet techniques connexes. – 1998. – vol. 52-n. – P. 11–12.
16. Прилуцкий В. П., Ахонин С. В. Сварка титановых сплавов вольфрамовым электродом в аргоне с применением флюсов // Тр. Междун. конф. «Титан-2007 в СНГ». – Ялта, 15–18 апр. 2007. – С. 441–448.
17. Prilutsky V. P., Akhonin S. V. TIG welding of titanium alloys using fluxes // Welding in the World. – 2014. – 58. – P. 245–251.

С. В. Ахонін, В. Ю. Білоус

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.  
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

#### АРГОНОДУГОВЕ ЗВАРЮВАННЯ ТИТАНУ ТА ЙОГО СПЛАВІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ФЛЮСІВ (ОГЛЯД)

В ІЕЗ ім. Є. О. Патона в 1950–1980 рр. були закладені наукові основи розробки флюсів для зварювання і плавки титану і титанових сплавів. Розроблено технологію автоматичного зварювання титану плавким електродом із застосуванням безкисневих флюсів. Розроблено спосіб аргонодугового зварювання вольфрамовим електродом по шару флюсу (TIG-F) і вольфрамовим електродом із застосуванням присадного титанового порошкового дроту (TIG-FW). Ці способи розширюють технологічні можливості дугового зварювання вольфрамовим електродом, забезпечують високу якість зварних з'єднань титану і гарантують відсутність пір в зварних швах. Бібліогр. 17, табл. 4, рис. 9.

*Ключові слова:* автоматичне дугове зварювання, аргонодугове зварювання, титанові сплави, плавкий електрод, неплавкий електрод, безкисневі флюси, порошковий дріт

Поступила в редакцію 23.01.2016

#### НОВАЯ КНИГА

Сборник трудов восьмой Международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах». – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2016. – 130 с. Мягкий переплет, 200x290 мм.

В сборнике представлены доклады восьмой Международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» (19–23 сентября 2016 г., Одесса, Украина), в которых отражены достижения за последние годы в области математического моделирования физических явлений, протекающих при сварке, наплавке и других родственных процессах. Авторами докладов являются известные ученые и специалисты из разных стран. Для научных и инженерно-технических работников, занятых в области сварки, резки, наплавки, пайки, нанесения защитных покрытий и других родственных процессов.

Заказы на сборник просьба направлять в редакцию журнала «Автоматическая сварка».

Сборники предыдущих семи конференций MMITWRP

за 2002, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012 и 2014 гг. находятся в открытом доступе

на сайте Издательского Дома «Патон»: <http://patonpublishinghouse.com/rus/proceedings/mmw>.

