

ВЛИЯНИЕ ПРИСАДОЧНОГО МЕТАЛЛА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ДВУХФАЗНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКОЙ

С.В. АХОНИН, В.Ю. БЕЛОУС, И.К. ПЕТРИЧЕНКО, Р.В. СЕЛИН

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03860, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича (Боженко), 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Сварные соединения высокопрочных титановых сплавов, выполненные дуговой сваркой, имеют, как правило, неудовлетворительные значения показателей механических свойств, особенно пластичности в состоянии после сварки по сравнению с основным металлом. В работе оценивалось влияние термического цикла сварки, типа присадочного металла и последующей термообработки на структуру и свойства сварных соединений двухфазных высоколегированных титановых сплавов, имеющих $\sigma_b > 1000$ МПа. Изучались свойства и структура сварных соединений высокопрочных титановых сплавов BT23, T110 и опытного сплава Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr, выполненных аргонодуговой сваркой с применением присадочных проволок, отличающихся по своему составу от основного металла. Соединения сложнoleгированного титанового сплава Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr целесообразно выполнять аргонодуговой сваркой с применением присадочной проволоки BT1-00св, на режимах, обеспечивающих сквозное проплавление и содержание составляющих проволоки в металле шва на уровне 10 %, в сочетании с последующим высокотемпературным отжигом. Библиогр. 6, табл. 1, рис. 6.

Ключевые слова: титановые сплавы, аргонодуговая сварка, присадочная проволока, свойства, структура

Сварные соединения высокопрочных титановых сплавов, выполненные дуговой сваркой, имеют, как правило, неудовлетворительные значения показателей механических свойств, особенно пластичности в состоянии после сварки по сравнению с основным металлом. Поэтому часто рекомендуется выполнять такие соединения с применением присадочного металла для улучшения механических свойств металла шва. Однако, в связи с ограниченным выбором присадочных материалов для сварки высокопрочных двухфазных титановых сплавов, при разработке технологии сварки новых высокопрочных титановых сплавов остро стоит проблема выбора типа присадочного материала.

При сварке титановых сплавов с высоким пределом прочности целесообразно изменять либо степень, либо систему легирования металла шва [1, 2]. Проще всего это выполнить при дуговой сварке плавлением с применением присадочных проволок, отличающихся по химическому составу от основного металла. Термический цикл дуговой сварки высоколегированных титановых сплавов приводит к существенному изменению структуры как околошовной зоны и металла шва, так и, как следствие, к ухудшению механических характеристик сварного соединения. Поэтому при разработке технологии сварки высокопрочных титановых сплавов и выборе или разработке присадочного

материала необходимо уделять внимание возможности получения сварных соединений с высокой ударной вязкостью, при этом прочность соединений должна составлять не менее 0,9 от прочности основного материала. Кроме того, для улучшения свойств сварного соединения на участке зоны термического влияния (ЗТВ) и для снятия сварочных напряжений целесообразно применять послесварочную термообработку.

Целью работы является оценка влияния термического цикла сварки, типа присадочного металла и последующей термообработки на структуру и свойства сварных соединений двухфазных высоколегированных титановых сплавов, имеющих $\sigma_b > 1000$ МПа. Сравнивались свойства сварных соединений высокопрочных титановых сплавов BT23, T110 и опытного сплава Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr [3], выполненных аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом (АДС) с применением присадочного металла в разделку и без разделки кромок.

Соединения высокопрочного титанового сплава BT23 [4] и T110 выполнялись АДС пластин толщиной 8 мм, сварка осуществлялась в разделку кромок с применением присадочной проволоки СП15св (рис. 1, а). Проволока марки СП15св (Ti-4,5Al-2,5Mo-2,5V-3,5Nb-1,5Zr) предназна-

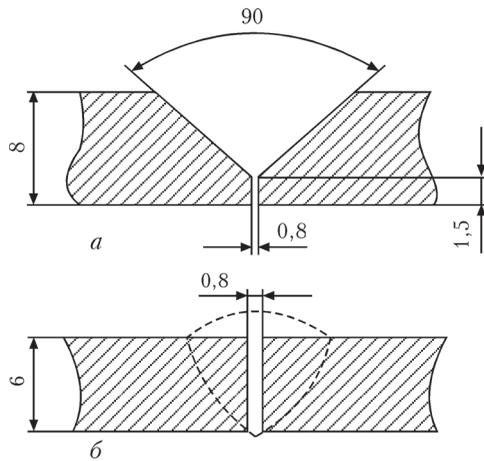


Рис. 1. Схема разделки кромок для АДС: *а* — односторонняя сварка с разделкой кромок и подачей присадочной проволоки марки СП15св; *б* — односторонняя сварка без разделки кромок с подачей присадочной проволоки марки ВТ1-00св

на для сварки высокопрочных титановых сплавов ВТ23 и ВТ22.

Высокопрочный сплав марки Т110 системы Ti–5,5Al–1,2Mo–1,2V–4Nb–2Fe–0,5Zr, разработан в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины совместно с АНТК им. О.К. Антонова [5].

Сварные соединения опытного высоколегированного сплава восьмикомпонентной системы Ti–6,5Al–3Mo–2,5V–4Nb–1Cr–1Fe–2,5Zr выполнялись толщиной 6 и 8 мм. Причем соединения толщиной 8 мм выполнялись многослойной АДС в разделку кромок с применением присадочной проволоки СП15св (рис. 1, *а*), а соединения толщиной 6 мм — сквозным проплавлением с применением присадочной проволоки ВТ1-00св (рис. 1, *б*). Сплав Ti–6,5Al–3Mo–2,5V–4Nb–1Cr–1Fe–2,5Zr содержит больше легирующих элементов по сравнению со сплавом Т110 и имеет в состоянии после отжига предел прочности, превышающий 1200 МПа.

Аргонодуговую сварку выполняли с одной стороны вольфрамовым электродом диаметром 5 мм. Ток сварки составлял 250...350 А, скорость сварки 10 м/ч. После сварки все сварные соединения подвергались отжигу. Температура отжига для экспериментального сплава Ti–6,5Al–3Mo–2,5V–

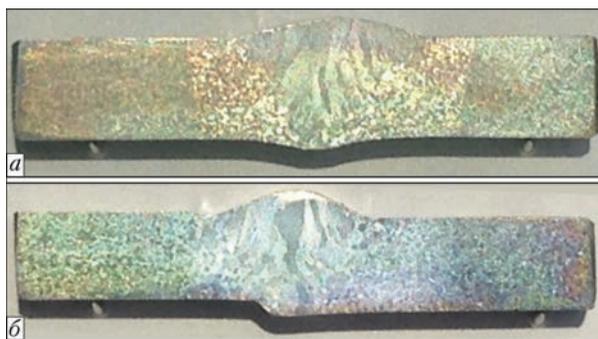


Рис. 2. Вид сварных соединений сплава Ti–6,5Al–3Mo–2,5V–4Nb–1Cr–1Fe–2,5Zr, выполненных АДС: *а* — в разделку кромок; *б* — без разделки кромок с подачей присадочной проволоки марки ВТ1-00св

4Nb–1Cr–1Fe–2,5Zr выбиралась с целью обеспечения наибольшей ударной вязкости металла шва и по результатам работы [3] составила 900 °С (1 ч) в сочетании с последующим охлаждением с печью. Примеры выполненных сварных соединений приведены на рис. 2.

Исследования показали, что сварное соединение сплава Ti–6,5Al–3Mo–2,5V–4Nb–1Cr–1Fe–2,5Zr, выполненное АДС сквозным проплавлением с применением присадочной проволоки ВТ1-00св, которая подавалась в процессе сварки со скоростью 60 м/ч, имеет содержание присадочного металла ВТ1-00св в составе шва на уровне 20 %, а соединение, выполненное АДС с проволокой ВТ1-00св, подававшейся со скоростью 30 м/ч, имеет содержание присадочного металла ВТ1-00св в составе шва на уровне 10 %. Соединение, сваренное АДС в V-образную разделку с применением проволоки СП15св, выполнялось за 3 прохода. Металл шва состоит преимущественно из металла СП15св.

Свойства полученных сварных соединений в состоянии после сварки и отжига приведены в таблице. Применение присадочной проволоки при АДС сплавов ВТ23 и Т110 в разделку кромок обеспечивает прочность сварных соединений на уровне 90 % от прочности самого сплава. Это условие не выполняется в случае АДС в разделку кромок соединений

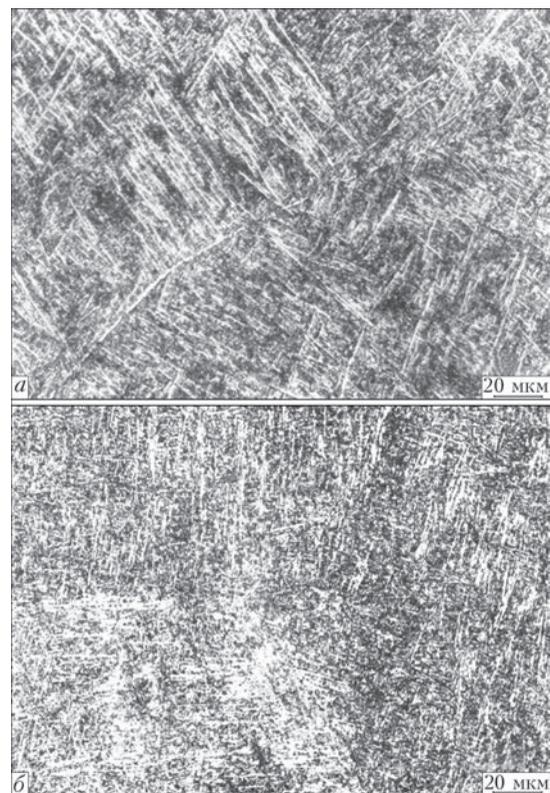


Рис. 3. Микроструктура металла шва, выполненного АДС с присадочной проволокой СП15св в состоянии после отжига 750 °С, 1 час: *а* — сплав ВТ23; *б* — сплав Т110

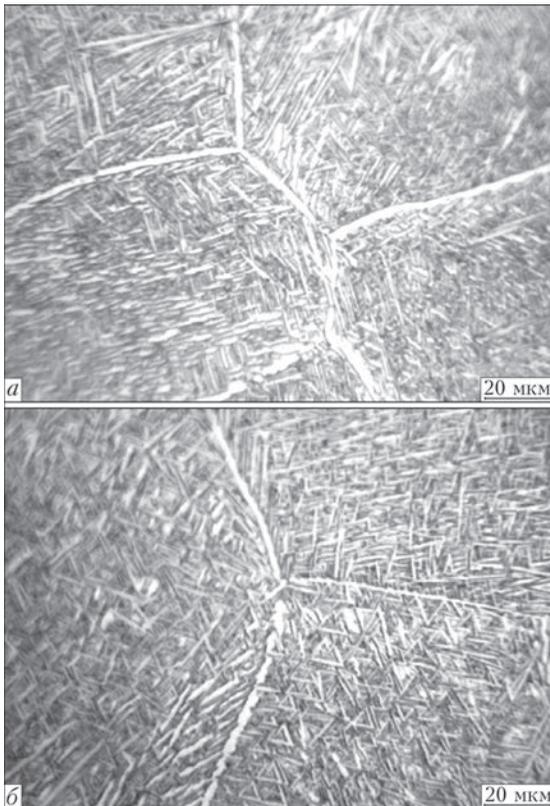


Рис. 4. Микроструктура основного металла и ЗТВ сварного соединения сплава Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr, выполненного АДС с применением присадочной проволоки ВТ1-00св, в состоянии после отжига 900 °С, 1 час: *а* — основной металл; *б* — ЗТВ

сплава Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr с применением проволоки СП15св.

Ширина швов в верхней части составляет около 14 мм, в корневой — около 3 мм (см. рис. 2). Макроструктуру металла швов, выполненных как в разделку так и без разделки, составляют неравноосные зерна, вытянутые в направлении теплоотвода. Наиболее крупные зерна располагаются в верхней части шва. Угол между осью зерна и осью шва составляет от 0 до 30°. Основной металл и металл ЗТВ состоит из равноосных зерен, соответствующих № 3-4 при сравнении с эталонными шкалами.

Исследования структуры полученных сварных соединений показали, что в процессе АДС сплава ВТ23 с проволокой СП15св имеет место незначительное снижение степени легирования металла шва. В состоянии после сварки в шве формируется структура, состоящая преимущественно из метастабильной $\alpha'(\alpha'')$ -фазы. В результате отжига образуется стабильная пластинчатая α -фаза и дисперсная смесь α - и β -фаз (рис. 3, *а*). В шве сплава Т110 в результате отжига при 750 °С также происходит распад метастабильных фаз с образованием пластинчатой α -фазы и мелкодисперсной смеси α - и β -фаз (рис. 3, *б*).

Восьмикомпонентный сплав Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr в исходном состоянии

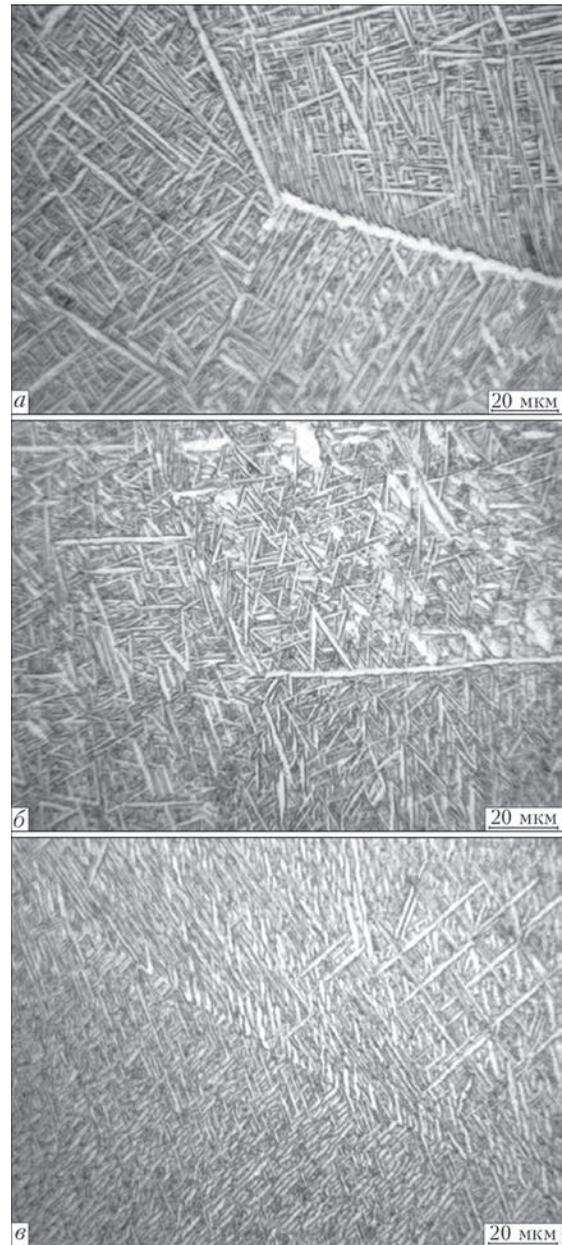


Рис. 5. Микроструктура металла шва сварного соединения сплава Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr выполненного АДС с применением сварочных проволок в состоянии после отжига 900 °С, 1 час: *а* — проволока ВТ1-00св, содержание в шве 20 %; *б* — проволока ВТ1-00св, содержание в шве 10%; *в* — проволока СП15св, сварка в разделку

имел мелкодисперсную структуру в пределах первичных β -зерен [3]. Морфология α -фазы в основном металле (ОМ) после отжига при 900 °С в течение 1 часа и охлаждением с печью — пластинчатая, ширина пластин составляет 1...1,5 мкм (рис. 4, *а*). По границам первичных β -зерен присутствует α -оторочка. В ЗТВ после такого же отжига структура металла также имеет пластинчатый характер (рис. 4, *б*), но пластины мельче, чем в металле шва, выполненного с применением сварочной проволоки ВТ1-00св (20 %), что связано с более высокой легированностью металла ЗТВ, чем металла шва. Замедленное охлаждение с пе-

чью от температуры 900 °С проводилось для предотвращения фиксирования метастабильных фаз.

Металл шва сплава Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr, выполненный с применением сварочной проволоки ВТ1-00св, когда в шве присутствует 20 % ВТ1-00св, отличается более крупнопластинчатой структурой (рис. 5, а). В металле шва α-пластины имеют большую длину и толщину 1,5...2 мкм, а в промежутках между пластинами — дисперсная (α+β)-структура. По сравнению с отжигом при 750 °С, когда структура металла всех зон сварного соединения оставалась мелкодисперсной [3], коагуляция α-фазы после отжига при 900 °С может обеспечивать некоторое повышение пластических свойств.

При введении в шов 10 % проволоки ВТ1-00св степень разбавления металла шва будет меньше, чем в предыдущем случае, поэтому микроструктура металла шва — мельче, пластины α-фазы — короче и имеют толщину 1...1,5 мкм (рис. 5, б).

При АДС в разделку кромок в металл шва попадает значительное количество металла присадочной проволоки, в данном случае проволоки СП15св, система легирования которой отличается от системы легирования основного металла, поэтому металл шва имеет структуру, отличающуюся от структур, полученных в случае применения проволоки ВТ1-00св. Микроструктура металла сварного шва сплава Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr, выполненного АДС в разделку кромок проволокой СП15св после отжига при 900 °С, представлена на рис. 5, в. Микроструктура металла рассматриваемого шва по сравнению с микроструктурой швов, выполненных с применением проволоки ВТ1-00св, отличается большей дисперсностью частиц α-фазы. Пластины α-фазы имеют меньшую длину, толщина их составляет 0,5...1,5 мкм.

Распределение микротвердости в металле швов сплава Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-

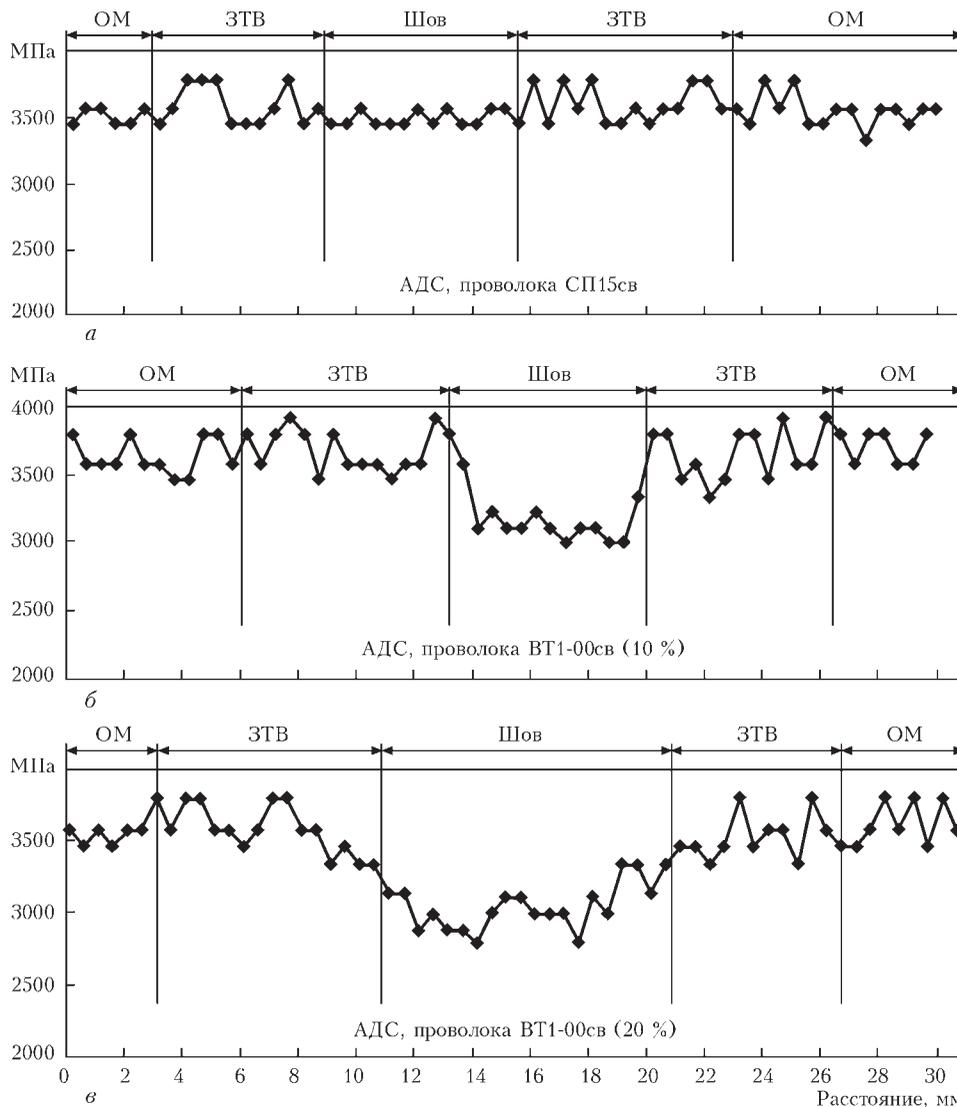


Рис. 6. Микротвердость сварного соединения опытного сплава Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr, выполненного АДС с присадочной проволокой в состоянии после отжига 900 °С, 1 час: а — присадочная проволока СП15св; б — присадочная проволока ВТ1-00св (10 %); в — присадочная проволока ВТ1-00св (20 %)

Механические свойства сварных соединений титановых сплавов, выполненных способом АДС с применением присадочного материала

Марка сплава	Присадочная проволока	Толщина металла, мм	Термообработка соединений	σ_B , МПа	Ударная вязкость металла шва <i>KCV</i> , Дж/см ²
BT23	СП15св	8	После сварки	1010	21
BT23	СП15св	8	Отжиг 750 °С, 1 ч, воздух	1090	22
T110	СП15св	8	После сварки	1030	20
T110	СП15св	8	Отжиг 750 °С, 1 ч, воздух	1020	35
Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr	BT1-00св 20 %	6	После сварки	1226	15
Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr	BT1-00св 20%	6	Отжиг 900 °С, 1 ч, охл. с печью	1048	27
Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr	BT1-00св 10 %	6	После сварки	1287	11
Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr	BT1-00св 10 %	6	Отжиг 900 °С, 1 ч, охл. с печью	1110	24
Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr	СП15св	8	После сварки	1208	18
Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr	СП15св	8	Отжиг 900 °С, 1 ч, охл. с печью	1047	25

2,5Zr в состоянии после отжига (рис. 6, а-в) показало большую неоднородность в соединениях с 20 % BT1-00св.

Таким образом, выполнять соединения АДС сложнолегированного титанового сплава Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr целесообразно с применением присадочной проволоки BT1-00св на режимах, обеспечивающих сквозное проплавление и содержание проволоки в металле шва на уровне 10 %. В результате воздействия последующего отжига при температуре 900 °С формируется более мелкодисперсная структура, чем при содержании металла присадочной проволоки 20 %, что обеспечивает удовлетворительные показатели прочности и ударной вязкости сварных соединений.

Выводы

1. Применение высоколегированной присадочной проволоки СП15св при АДС в разделку кромок сплавов BT23 и T110 с последующим отжигом при температуре 750 °С обеспечивает необходимый уровень механических свойств сварных соединений.

2. Применение высоколегированной присадочной проволоки СП15св для выполнения соединений АДС в разделку кромок высокопрочного восьмикомпонентного титанового сплава Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr не обеспечивает необходимый уровень прочности сварных соединений.

3. Применение послесварочного отжига при 900 °С в случае АДС высокопрочного сплава системы Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr обеспечивает полный распад метастабильных фаз, в результате отжига формируется равновесная, более мелкодисперсная структура, обеспечивающая удовлетворительные показатели ударной вязкости соединений.

4. Высокие значения прочности ($\sigma_B = 1110$ МПа) при удовлетворительной ударной вязкости ($KCV = 24$ Дж/см²) соединений высокопрочного сплава Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr, выполненных АДС, получены при использовании присадочной проволоки BT1-00св и режимах сварки, обеспечивающих сквозное проплавление и содержание присадочного металла в шве на уровне 10 % основного металла.

1. *Изыскание* присадочного материала для сварки титановых сплавов / С.М. Гуревич, Н.А. Кушниренко, В.Ф. Топольский // Актуальные проблемы сварки цветных металлов. – Киев: Наук. думка, 1980. – С. 234–236.
2. *Zamkov V.N., Topolskiy V.F., Tyapko I.K.* Peculiarities of metallurgy and arc welding technology of heat hardenable titanium alloys // Welding Technology Paton Institute at TWI, Abington, Cambridge, UK, 13–14 October, 1993.
3. *Структура* и свойства сварных соединений высокопрочных двухфазных титановых сплавов / С.В. Ахонин, В.Ю. Белоус, Р.В. Селин и др. // Автомат. сварка. – 2015. – № 8. – С. 16–19.
4. *Хорев А.И.* Высокопрочный титановый сплав BT23 и его применение в перспективных сварных конструкциях // Сварочн. пр-во. – 2008. – № 9. – С. 3–8.
5. *Пат. України 40087.* Високоміцний титановий сплав / В.М. Замков, В.П. Топольський, М.П. Тригуб та ін. – Опубл. 16.06.2003; Бюл. № 6.

Поступила в редакцию 13.10.2015