



СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ДВУХФАЗНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ ЭЛС И ТИГ

С.В. АХОНИН, В.Ю. БЕЛОУС, Р.В. СЕЛИН, И.К. ПЕТРИЧЕНКО, Э.Л. ВРЖИЖЕВСКИЙ
ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Современные двухфазные высоколегированные сплавы на основе титана характеризуются высокой удельной прочностью, термический цикл сварки приводит к изменению структур металла шва и зоны термического влияния, а также ухудшению механических характеристик соединения. В работе оценивали свойства сварных соединений титановых сплавов BT23, T110 и высоколегированного сплава Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr, выполненных электронно-лучевой и аргонодуговой сваркой. В металле шва и ЗТВ соединений высоколегированного титанового сплава Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr, выполненных методом АДС, формируется структура с преобладанием метастабильной β -фазы и низкими значениями прочности и ударной вязкости, соединения требуют применения высокотемпературного послесварочного отжига с температурой не менее 900 °С. Соединения сплава BT23 имеют высокие значения прочности и ударной вязкости. Высокопрочный титановый сплав T110 характеризуется хорошей свариваемостью при ЭЛС и АДС, имеет после отжига высокие значения ударной вязкости металла шва и ЗТВ, при этом прочность сварных соединений на уровне 0,9 прочности основного металла. Библиогр. 7, рис. 4, табл. 2.

Ключевые слова: титановые сплавы, аргонодуговая сварка, электронно-лучевая сварка, свойства

Современные двухфазные высоколегированные сплавы на основе титана характеризуются высокой удельной прочностью, в настоящее время все большее внимание уделяется расширению использования сварных конструкций и узлов из сплавов титана высокой прочности ($\sigma_b > 1100$ МПа) [1, 2]. Свариваемость двухфазных высоколегированных сплавов титана, применение которых может дать наибольшее снижение массы конструкции, значительно хуже, чем сплавов низколегированных, и по этому показателю они уступают даже некоторым высокопрочным сталям, поэтому при разработке новых титановых сплавов существенное внимание уделяется возможности получения сварных соединений с прочностью не менее 0,90...0,95 прочности основного материала.

Целью работы является оценка свойств сварных соединений как промышленных, так и новых, разработанных в ИЭС им. Е.О. Патона, двухфазных высоколегированных титановых сплавов, имеющих $\sigma_b > 1000$ МПа (табл. 1), а также изучение влияния термического цикла сварки и последующей термообработки на структурно-фазовые

превращения в металле шва и зоне термического влияния (ЗТВ).

В ходе исследований сравнивали свойства сварных соединений, выполненных электронно-лучевой сваркой (ЭЛС) и аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом (АДС), без применения присадочного металла.

Соединения высокопрочного титанового сплава BT23 [3] выполняли из пластин толщиной 10 мм, соединения титанового сплава марки T110 — из пластин толщиной 7 мм. Высокопрочный сплав марки T110 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 [4]. Он содержит легирующие элементы в количестве, мас. %: 5,0...6,0 Al, 3,5...4,8 Nb, 0,8...1,8 Mo, 0,8...2,0 V, 1,5...2,5 Fe, 0,3...0,8 Zr. Сплав T110 по сравнению с BT23 имеет более высокую устойчивость против образования усталостных трещин и по ряду служебных характеристик, например, по усталостной долговечности основного металла (ОМ), превышает показатели сплава BT23 на 15...20 % [5].

Таблица 1. Механические свойства высокопрочных двухфазных титановых сплавов

Марка сплава	Эквивалент молибдена	Толщина металла, мм	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	KCV, Дж/см ²
BT23	5,7...8,0	10	1030	980	13	35
T110	4,4...7,9	7	1190	1150	18	31
Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr	5,6...10,5	8	1195	1110	15	13

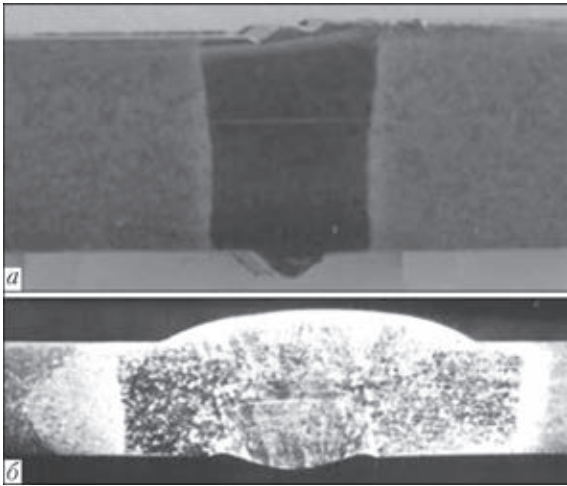


Рис. 1. Поперечный макрошлиф сварного соединения титанового сплава $Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr$ толщиной 8 мм, выполненный ЭЛС (а) и АДС (б)

Также оценивали свойства сварных соединений опытного высоколегированного сплава восьмикомпонентной системы $Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr$. Он содержит больше легирующих элементов по сравнению со сплавом Т110 и имеет в состоянии после отжига предел прочности, превышающий 1200 МПа. Соединения сплава $Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr$ толщиной 8 мм выполняли методами АДС и ЭЛС.

АДС выполняли с двух сторон вольфрамовым электродом диаметром 5 мм в аргоне без подачи присадочного металла. Ток сварки составлял 300...350 А, скорость сварки 10 м/ч. ЭЛС проводили в установке УЛ-144, укомплектованной источником питания ЭЛА 60/60. Ускоряющее

напряжение составляло 60 кВ, скорость сварки 25 м/ч. Примеры выполненных сварных соединений приведены на рис. 1.

Непосредственно после сварки металл швов сплава ВТ23, выполненных АДС, представляет собой крупные первичные β -зерна, внутризеренная структура металла шва характеризуется наличием мартенситной α'' -фазы [2]. Для повышения пластических характеристик сварных соединений сплава ВТ23 наиболее простым способом является последующая термическая обработка — отжиг [6]. После термообработки структура характеризуется наличием мелкодисперсных продуктов распада метастабильных фаз с образованием равновесных α - и β -фаз, однако прочность сварного соединения после отжига уменьшается до уровня ниже 1000 МПа.

Металл швов сплава Т110, выполненных ЭЛС, состоит из равноосных и вытянутых в направлении теплоотвода β -зерен (рис. 2, а), внутри которых наблюдается равномерный распад твердого раствора с выделением дисперсных частиц мартенситной α' -фазы [7]. В околошовном участке зерно первичной β -фазы более мелкое.

Микроструктура сварных соединений сплава Т110, выполненных дуговой сваркой, принципиально не отличается от микроструктуры соединений, выполненных ЭЛС. Металл швов и околошовных участков соединений, полученных методом АДС, имеет структуру β -превращенного зерна с выделениями мелкоигольчатой мартенситной α' -фазы. В участках металла ЗТВ, прилегающих к ОМ, помимо указанных структурных элементов внутри зерен наблюдается первичная крупнопластинчатая α -фаза. Идентична структура и соединений, выполненных АДС. Соединения, выполненные ЭЛС, имеют значительно меньшую структурно-измененную зону сплавления и термического влияния по сравнению с соединениями, выполненными вольфрамовым электродом. Прочность швов, выполненных АДС и ЭЛС, находится на одном уровне. Для соединений, полученных ЭЛС, типичным местом разрушения разрывных образцов является ОМ, для АДС — сварной шов. После сварки сварные соединения, выполненные ЭЛС, имеют прочность, равную или более ОМ, а прочность сварных соединений, выполненных дуговой сваркой, находится на уровне 0,9 % прочности самого сплава, отжиг при 750 °С с последующим охлаждением в печи приводит к дальнейшему снижению прочности сварных соединений, однако показатели ударной вязкости повышаются до 30 Дж/см² для соединений, выполненных дуговой сваркой. Для повышения ударной вязкости соединений, выполненных ЭЛС, необходимо применять более высокотемпературный от-

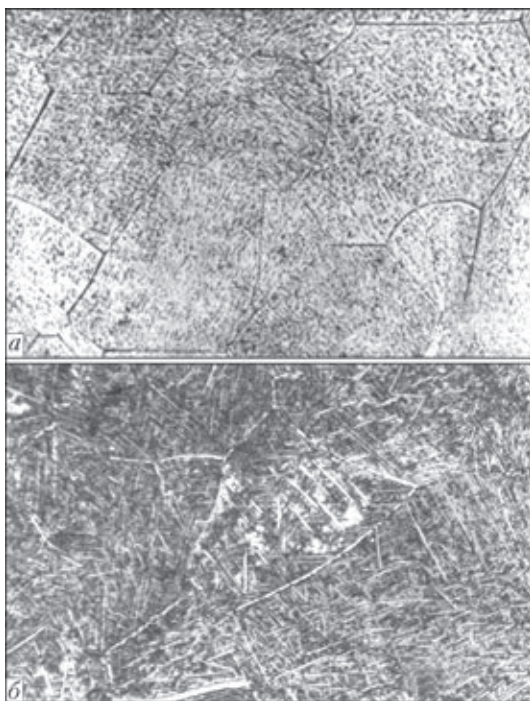


Рис. 2. Микроструктура ($\times 400$) металла шва сварного соединения титанового сплава Т110, выполненного ЭЛС: а — после сварки; б — после отжига 750 °С, 1 ч

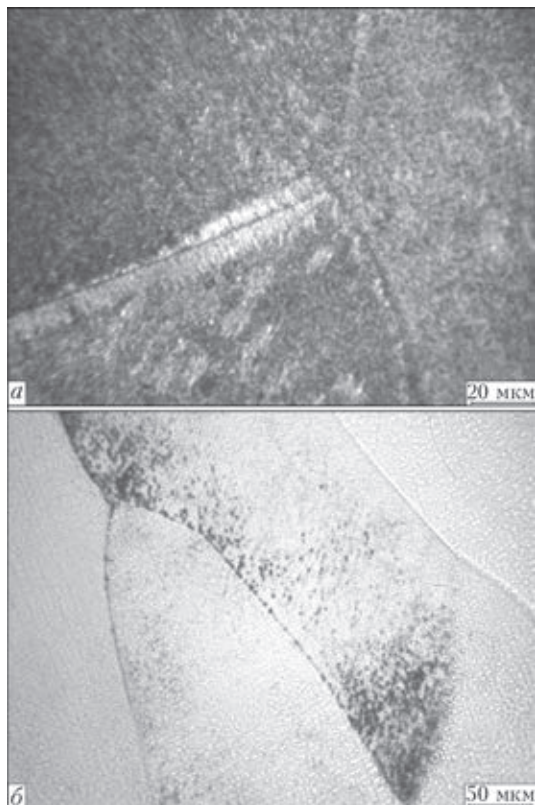


Рис. 3. Микроструктура металла сварного соединения титанового сплава Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr, выполненного ЭЛС: *a* — ОМ; *б* — металл шва после сварки

жиг — 850 °С. После этого отжига происходит распад метастабильных фаз с преобладанием пластинчатой α -фазы (рис. 2, *б*), параметры которой способствуют повышению ударной вязкости при высоком уровне прочности.

Высоколегированный сплав Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr имеет коэффициент стабилизации β -фазы в пределах 0,96...1,07 и также, как и рассмотренные выше сплавы, подвергается закалке в результате воздействия термического цикла сварки.

После ЭЛС в металле шва и ЗТВ сплава Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr фиксируется метастабильная β -фаза (рис. 3, *a*) с равноосными и вытянутыми в направлении теплоотвода зернами. Кроме того, как по границам β -зерен, так и в объеме зерна наблюдаются локальные скопления метастабильной α -фазы в виде очень дисперсных точечных выделений. Для снятия сварочных напряжений и стабилизации структуры соединения после ЭЛС проводили как отжиг, так и локальную электронно-лучевую термообработку (ЛТО), которая заключалась в послесварочном нагреве зоны сварного соединения электронным лучом, при этом температура зоны нагрева поддерживалась на уровне 850 °С на протяжении 5 мин. Отжиг при температуре 800 °С с замедленным охлаждением привел к распаду зафиксированных при сварке метастабильных α - и β -фаз с образова-

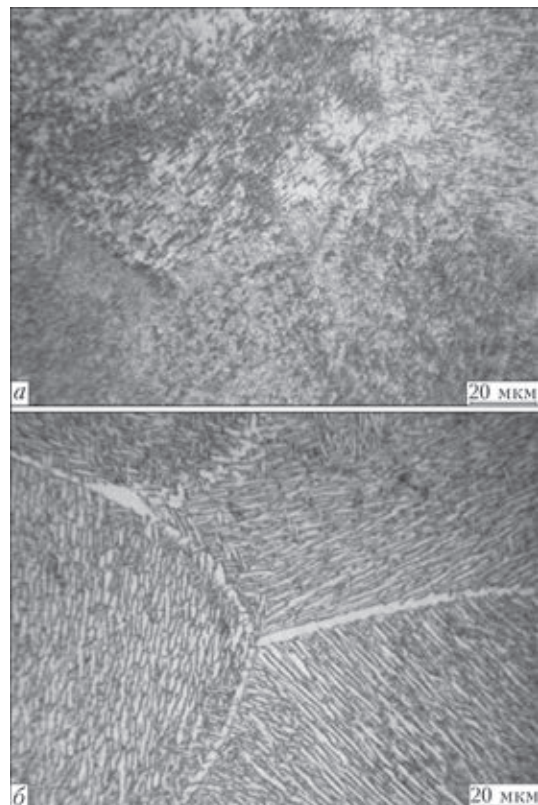


Рис. 4. Микроструктура металла шва сплава Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr, выполненного ЭЛС после ЛТО (*a*) и отжига 900 °С (*б*)

нием дисперсных α - и β -частиц, при этом значения ударной вязкости возрастают незначительно.

Изучение механических свойств сварных соединений сплава Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr, выполненных ЭЛС с последующей ЛТО (табл. 2), показало несколько более высокие значения прочности ($\sigma_b = 1258$ МПа) и меньшие значения ударной вязкости металла шва ($KCV = 7$ Дж/см²) по сравнению с соответствующими значениями сварных соединений в состоянии после печного отжига при 900 °С в течение 1 ч. По-видимому, это объясняется неполным распадом метастабильных структур в металле шва в результате воздействия непродолжительной ЛТО на протяжении 5 мин и образования в результате тонкоигольчатой α -фазы.

Металл швов сплава Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr, выполненных АДС, в состоянии после сварки также состоит из равноосных и вытянутых в направлении теплоотвода зерен метастабильной β -фазы (рис. 3, *б*), зафиксированной при резком охлаждении после сварки. В объеме β -зерен и на их границах наблюдается незначительное количество дисперсных выделений метастабильной α -фазы. В результате термического цикла сварки в шве сформировались метастабильные структуры с преобладающим содержанием β -фазы. Выделение дисперсных частиц метастабильной α -фазы наблюдается по границам зерен и суб-



Таблица 2. Механические свойства сварных соединений титановых сплавов

Марка сплава (способ сварки)	Толщина металла, мм	Состояние соединений	σ_v , МПа	Ударная вязкость KCV, Дж/см ²	
				металл шва	ЗТВ
BT23(АДС)	10	После сварки	1030	27	23
BT23(АДС)	10	Отжиг 750 °С, 1 ч, воздух	970	30	28
T110 (ЭЛС)	7	После сварки	1140	10	10
T110 (ЭЛС)	7	Отжиг 750 °С, 1 ч, воздух	1160	12	23
T110 (ЭЛС)	7	Отжиг 850 °С, 1 ч, воздух	1120	21	26
T110 (АДС)	7	После сварки	1118	11	10
T110 (АДС)	7	Отжиг 750 °С, 1 ч, воздух	1078	29	30
Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr (АДС)	8	После сварки	960	5	5
Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr (ЭЛС)	8	После сварки	1248	7	6
Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr (ЭЛС)	8	ЛТО 850 °С, 5 мин	1258	7	14
Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr (ЭЛС)	8	Отжиг 900 °С, 1 ч, воздух	1131	12	13

зерен и также фиксируется в теле зерна как в шве, так и в металле ЗТВ. Метастабильная β -фаза имеет низкую прочность, поэтому сварные соединения, выполненные методом АДС, имеют низкие показатели прочности в состоянии после сварки, кроме того, в связи с наличием значительной объемной доли метастабильной α -фазы, металл шва и ЗТВ имеет и низкую ударную вязкость (табл. 2).

Таким образом, АДС высоколегированного титанового сплава Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr целесообразно выполнять с применением присадочных материалов, что позволит снизить степень легирования металла шва и обеспечить более высокие значения прочности, пластичности и ударной вязкости.

Выводы

1. Высокопрочный титановый сплав BT23 характеризуется хорошей свариваемостью, в состоянии после сварки в металле шва и ЗТВ присутствуют метастабильные β - и α'' -фазы, и хотя значения ударной вязкости металла шва достаточно высокие ($KCV = 29$ Дж/см² при $\sigma_v = 1128$ МПа), сварные соединения требуют проведения последующей термической обработки для стабилизации структуры.

2. Высокопрочный титановый сплав T110 отличается хорошей свариваемостью при получении сварных соединений ЭЛС и АДС вольфрамовым электродом сквозным проплавлением и имеет после отжига высокие значения ударной вязкости металла шва и ЗТВ и прочность сварных соединений на уровне 0,9 прочности основного металла.

3. Соединения, выполненные методом АДС высоколегированного титанового сплава Ti-

6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr, имеют низкие значения ударной вязкости в шве и ЗТВ, в металле шва и ЗТВ формируется структура с преобладанием метастабильной β -фазы, сварные соединения требуют применения высокотемпературного послесварочного отжига с температурой 900 °С, при которой ударная вязкость увеличивается в 2 раза.

4. Сварные соединения, выполненные ЭЛС, высоколегированного титанового сплава Ti-6,5Al-3Mo-2,5V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr с наибольшей пластичностью и ударной вязкостью ($KCV = 12,4$; $\delta_s = 12$ %) получены после применения отжига при температуре 900 °С, 1 ч, с последующим охлаждением с печью.

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. С. 7–17.
2. Хорев А.И. Теория и практика создания титановых сплавов для перспективных конструкций // Технология машиностроения. – 2007. – № 12. – С. 5–13.
3. Хорев А.И. Высокопрочный титановый сплав BT23 и его применение в перспективных сварных конструкциях // Свароч. пр-во. – 2008. – № 9. – С. 3–8.
4. Пат.України 40087. Високоміцний титановий сплав / В.М. Замков, В.П. Топольський, М.П. Тригуб та ін. – Опубл. 16.06.2003; Бюл. № 6.
5. Исследование механических свойств кованных полуфабрикатов опытного титанового сплава T110 / С.Л. Антонюк, В.Н. Замков, В.Ф. Топольский и др. // Современ. электрометаллургия. – 2003. – № 3. – С. 30–33.
6. Хорев А.И., Йоода А.В., Красножан А.И. Механические свойства и структура сварных соединений из титанового сплава BT23, выполненных ЭЛС // Свароч. пр-во. – 1981. – № 7. – С. 25–26.
7. Упрочняющая термическая обработка, механические характеристики и структура свариваемого высокопрочного титанового сплава T110 / В.Н. Замков, В.Ф. Топольский, В.А. Трофимов и др. // Титан-2005 в СНГ. – Киев, 2005. – С. 198–208.

Поступила в редакцию 28.05.2015