



## СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА Т110, ВЫПОЛНЕННЫХ СВАРКОЙ ПЛАВЛЕНИЕМ

С. В. АХОНИН<sup>1</sup>, В. Ю. БЕЛОУС<sup>1</sup>, С. Л. АНТОНЮК<sup>2</sup>, И. К. ПЕТРИЧЕНКО<sup>1</sup>, Р. В. СЕЛИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup> ГП «Антонов». 03062, г. Киев, ул. Академика Туполева, 1. E-mail: lavrenko@antonov.com

Сварку высокопрочных титановых сплавов в настоящее время возможно выполнять дуговым способом, электронным лучом в вакууме (ЭЛС), лазерным лучом. Известны успешные примеры применения совмещенного лазерно-дугового процесса для выполнения сварных соединений титановых сплавов. В ряде случаев отмечается отрицательное влияние термического цикла ЭЛС и лазерной сварки на свойства ряда легированных титановых сплавов. Цель настоящей работы состояла в изучении влияния различных способов сварки и присадочного металла на механические свойства и структуру сварных соединений на примере высокопрочного титанового сплава Т110. Показано, что высокопрочный титановый сплав Т110 отличается хорошей свариваемостью при выполнении сварных соединений ЭЛС, аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом сквозным проплавлением, аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом по слою флюса и лазерно-дуговой сваркой. В качестве присадочной проволоки для аргонодуговой сварки сплава Т110 целесообразно применять проволоку марки СП15, в случае сварки без применения присадочного материала наибольшие значения ударной вязкости металла шва и ЗТВ обеспечивает аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом по слою флюса. Библиогр. 8, табл. 2, рис. 3.

*Ключевые слова:* титановые сплавы, Т110, аргонодуговая сварка, свойства, лазерная сварка, флюс

Титановые сплавы характеризуются высокой прочностью, жаропрочностью при умеренных температурах и коррозионной стойкостью в большинстве агрессивных сред. Благодаря таким качествам они находят применение для изготовления ответственных конструкций в самолетостроении, двигателестроении, химической и других областях промышленности. В настоящее время все большее внимание уделяется расширению использования сварных конструкций и узлов из сплавов титана высокой прочности ( $\sigma_b \geq 1100$  МПа). Сварка — один из наиболее распространенных технологических процессов при создании сложных деталей и узлов, поэтому свариваемость титанового сплава — это важный фактор, определяющий целесообразность его применения. Однако свариваемость существующих высокопрочных 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. В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины совместно с ГП «Антонов» разработан новый высокопрочный титановый сплав Т110 системы Ti–Al–Mo–V–Nb–Fe–Zr, содержащий легирующие элементы в количестве (мас. %): (5,0...6,0) алюминия, (3,5...4,8) ниобия, (0,8...1,8) молибдена, (0,8...2,0) ванадия, (1,5...2,5) железа, (0,3...0,8) циркония [1, 2]. Раз-

работанный сплав по своим служебным характеристикам превосходит сплавы ВТ22 и ВТ23.

Сварку высокопрочных титановых сплавов в настоящее время возможно выполнять дуговым способом, электронным лучом в вакууме (ЭЛС), лазерным лучом. Дуговая сварка позволяет изменять химический состав металла шва и имеет такие преимущества как дешевизна и простота оборудования. ЭЛС и сварка лазерным лучом отличаются высокой концентрацией энергии в пятне нагрева и соответственно высокой проплавляющей способностью и производительностью, однако введение присадочного металла при этом затруднительно. В ряде случаев отмечается отрицательное влияние термического цикла ЭЛС и лазерной сварки на свойства ряда легированных титановых сплавов ВТ23, ВТ22 [3], что связано с более высокими скоростями нагрева и охлаждения металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ). Известны успешные примеры применения совмещенного лазерно-дугового процесса для выполнения сварных соединений титановых сплавов [4]. Поэтому представляется целесообразным изучить влияние различных способов сварки на механические свойства и структуру сварных соединений высокопрочного титанового сплава Т110.

Цель настоящей работы состояла в изучении влияния различных способов сварки и присадочного металла на механические свойства и структуру-

ру сварных соединений на примере высокопрочного титанового сплава Т110.

В ходе работ исследовали свойства сварных соединений титанового сплава Т110 толщиной 7 и 13 мм, выполненных различными способами. Механические свойства основного металла приведены в табл. 1.

Пластины титанового сплава Т110 толщиной 7 мм сваривали ЭЛС, аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом (ТИГ) со сквозным проплавлением; аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом по слою флюса (А-ТИГ) [5] и аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом в разделку. В последнем случае в качестве присадочной проволоки использовали легированную проволоку марки СП-15 (Ti-4,5Al-2,5Mo-2,5V-3,5Nb-1,5Zr) [6], которая может применяться для сварки высокопрочных титановых сплавов BT23 и BT22 [7]. Дуговую сварку пластин толщиной 7 мм вольфрамовым электродом в аргоне выполняли в автоматическом режиме лабораторной сварочной головкой с применением источника питания ARISTO-500 фирмы ESAB. ЭЛС проводили в установке УЛ-144, укомплектованной источником питания ЭЛА 60/60. Сварку металла методом А-ТИГ выполняли с применением флюса марки АНТ-25 А [8]. Пластины титанового сплава Т110 толщиной 13 мм сваривали лазерно-дуговой сваркой. Лазерной сваркой выполняли наплавку на пластины толщиной 13 мм сплава Т110. Лазерную и лазерно-дуговую сварку осуществляли с применением лазерной установки DY 044 (Nd:YAG-лазер, длина волны 1,06 мкм) по схеме, согласно которой вольфрамовый электрод расположен перед лазерным лучом, а сам лазерный луч попадает в хвостовую часть сварочной ванны [4]. При этом в качестве источника питания сварочной дуги применен сварочный выпрямитель ВДУ-601.

Примеры выполненных сварных соединений приведены на рис. 1 и 2.

Металл швов, выполненных ЭЛС, состоит из превращенных равноосных  $\beta$ -зерен, внутри которых наблюдается равномерный распад твердого раствора с выделением дисперсных колоний частиц вторичной  $\alpha$ -фазы, в околошовном участке зерно бывшей  $\beta$ -фазы более мелкое, что свидетельствует о меньшем тепловложении в собирательную рекристаллизацию. По мере удаления от

Таблица 1. Механические свойства титанового сплава Т110

Толщина металла	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	KCV, Дж/см <sup>2</sup>
7	1190	1150	31
13	1130	999	38

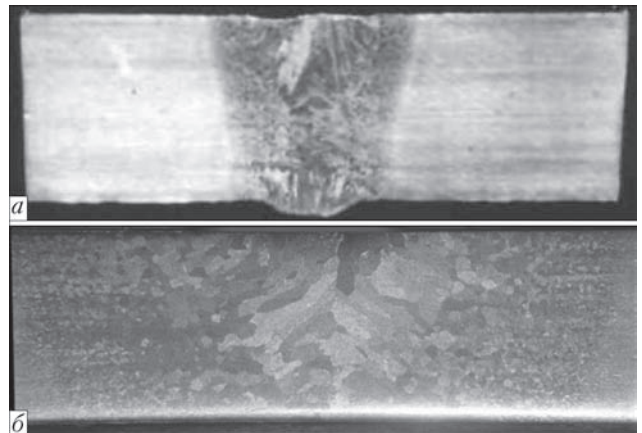


Рис. 1. Поперечные макрошлифы сварного соединения титанового сплава Т110 толщиной 7 мм, выполненные ЭЛС (а) и АДСВ (б)

зоны сплавления в основной металл размер полиэдрических равноосных зерен уменьшается. Сварные соединения сплава Т110, выполненные ЭЛС, как и сварные соединения промышленных сплавов титана подобного типа имеют высокую прочность, недостаточную пластичность и ударную вязкость, поэтому для повышения этих характеристик сварные соединения сплава Т110, выполненные ЭЛС, целесообразно подвергать отжигу.

В сварном шве сплава Т110, выполненном лазерной сваркой, четко прослеживается дендритная структура (рис. 3, а), на фоне которой наблюдаются первичные  $\beta$ -зерна, вытянутые в направлении теплоотвода. В металле шва, выполненного лазерной сваркой, фиксируются метастабильные  $\beta$ - и  $\alpha'/\alpha''$ -

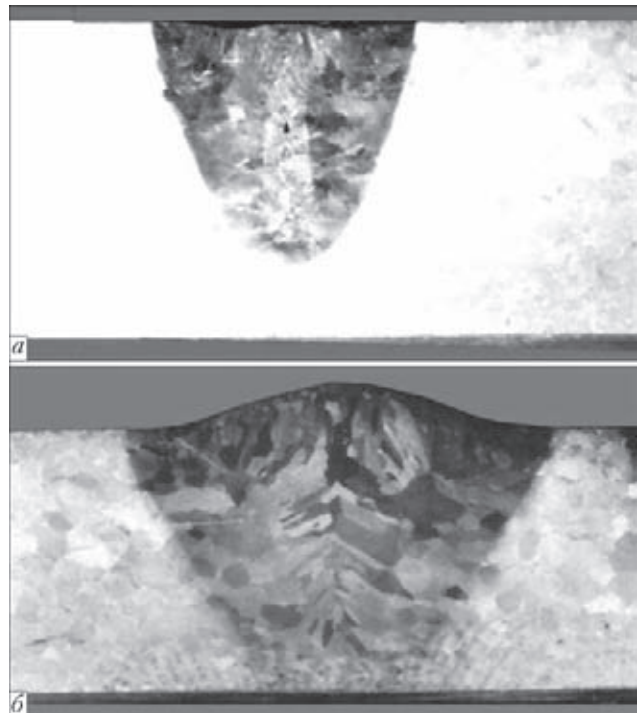


Рис. 2. Поперечные макрошлифы швов титанового сплава Т110 толщиной 13 мм, выполненные лазерной (а) и лазерно-дуговой сваркой (б) при одинаковой мощности лазерного луча

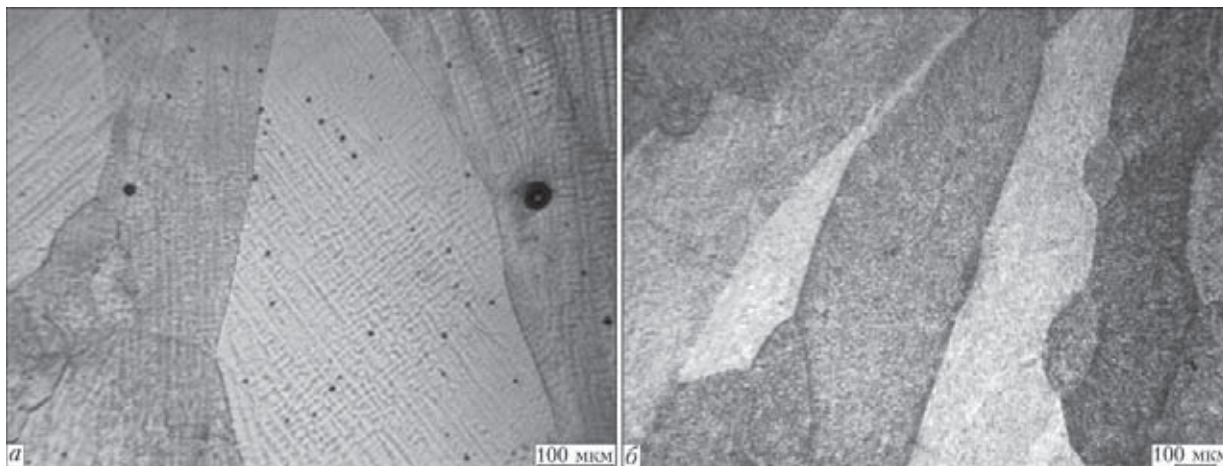


Рис. 3. Микроструктура металла сварного шва сплава Т110, выполненного лазерной (а) и лазерно-дуговой сваркой (б)

фазы, в зернах шва присутствует субструктура. Исследование микроструктуры сварных соединений титановых сплавов позволили сделать вывод, что металл шва, полученный одной лишь лазерной сваркой, имеет более высокие внутренние напряжения, о чем опосредственно свидетельствует наличие многочисленных ямок травления на поперечных микрошлифах вдоль зоны сплавления, которые вытравливаются в местах выхода на поверхность сосредоточений дислокаций. В металле ЗТВ сварных соединений, выполненных лазерной сваркой, отсутствует участок крупного зерна. В металле ЗТВ сварных соединений, выполненных лазерно-дуговой сваркой, участок крупного зерна присутствует. В отличие от сварного соединения сплава Т110, выполненного лазерной сваркой, ни в шве, ни в металле ЗТВ сварного соединения, выполненного лазерно-дуговой сваркой, не наблюдалось субструктуры, микроструктура была более однородной и равномерной (рис. 3, б). При травлении шлифа сварного соединения, выполненного лазерно-дуговой сваркой, в таком же реактиве и в течение такого же времени, что и шлиф сварного соединения, выполненного лазерной сваркой, ямки травления не появлялись. Вероятно, это может быть связано с более низким уровнем сварочных напряжений при лазерно-дуговой сварке сплава Т110, чем при лазерной сварке.

Микроструктура сварных соединений, выполненных дуговой сваркой, принципиально не отличается от микроструктуры соединений, выполненных ЭЛС. Так, металл однопроходных швов и околовшовных участков соединений, полученных сквозным проплавлением методом ТИГ, имеет характерную пластинчатую структуру  $\beta$ -превращенного зерна, где между более грубыми пластинами  $\alpha$ -фазы заметны более мелкие выделения третичной  $\alpha$ -фазы. Как и в швах, выполненных ЭЛС, в отдельных зернах наблюдаются участки с частично превращенной  $\beta$ -фазой и  $\alpha$ -оторочка по границам  $\beta$ -зерен. В участках металла ЗТВ, прилега-

ющих к основному металлу, помимо указанных структурных элементов внутри зерен наблюдается первичная глобулярная  $\alpha$ -фаза. Общим отличием микроструктуры соединений, выполненных дуговой сваркой, является величина структурных элементов. Они, как правило, более крупные, чем, вероятно, и объясняется относительно низкий уровень прочности дуговых швов (табл. 2). Соединения, выполненные ЭЛС и лазерной сваркой, имеют значительно меньшую структурно измененную зону (сплавления и термического влияния) по сравнению с соединениями, выполненными вольфрамовым электродом. Такое структурное отличие должно оказывать положительное влияние на условия пластической деформации в процессе нагружения. Об этом свидетельствует анализ мест разрушения сварных образцов после механических испытаний. Для соединений ЭЛС типичным местом разрушения является основной металл, для ТИГ — сварной шов. Для соединений, выполненных лазерно-дуговой сваркой, типичным местом разрушения является сварной шов, для лазерной — основной металл. Сравнение глубины проплавления при лазерно-дуговой и лазерной сварке, выполненного на режиме с аналогичными параметрами лазерного луча, показало двукратное повышение по глубине провара (см. рис. 2) при неизменной мощности лазерного луча. Сварные соединения сплава Т110, выполненные ЭЛС и лазерной сваркой, имеют высокую прочность и недостаточную ударную вязкость (табл. 2).

Следует отметить высокую ударную вязкость металла ЗТВ сварных соединений, выполненных А-ТИГ по слою флюса и лазерно-дуговой сваркой. Наибольшую ударную вязкость металла шва имеют соединения, выполненные многопроходной дуговой сваркой с разделкой кромок с применением присадочной проволоки СП15, имеющей меньшее содержание легирующих элементов по сравнению с основным металлом. Наименьшую ударную вязкость имеет металл шва, выполненного лазерной

Таблица 2. Механические свойства сварных соединений титанового сплава Т110, выполненных различными способами сварки (состояние соединений — после сварки)

Способ сварки	Толщина металла, мм	$\sigma_b$ , МПа	Ударная вязкость КСV, Дж/см <sup>2</sup>	
			металл шва	ЗТВ
ЭЛС	7	1140	10	10
ТИГ со сквозным проплавлением	7	1118	11	10
ТИГ с разделкой кромок	7	1030	20	12
А-ТИГ по слою флюса	7	1120	18	20
Лазерная	13	1131	6	13
Лазерно-дуговая	13	1180	15	23

сваркой. Прочность сварных соединений титанового сплава Т110, выполненных лазерной и лазерно-дуговой сваркой, больше прочности основного металла на 2...4 %, что объясняется наличием в металле шва дендритной структуры, характерной для литого металла шва.

Таким образом, результаты выполненных исследований свидетельствуют о хорошей свариваемости сплава Т110 независимо от способа сварки.

### Выводы

1. Высокопрочный титановый сплав Т110 отличается хорошей свариваемостью при выполнении сварных соединений ЭЛС, аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом сквозным проплавлением, аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом по слою флюса и лазерно-дуговой сваркой.

2. После сварки сварные соединения, выполненные ЭЛС, имеют прочность, равную основному металлу, а прочность сварных соединений, выполненных дуговой сваркой, составляет не менее 90 % прочности самого сплава. Для повышения уровня механических свойств сварных соединений сплава Т110 возможно применение термической обработки.

3. В качестве присадочной проволоки для аргонодуговой сварки сплава Т110 целесообразно применять проволоку марки СП15.

4. Лазерно-дуговая сварка позволяет получать сварные соединения высокопрочного титанового сплава Т110 с более широким комплексом механических характеристик и меньшими внутренними напряжениями по сравнению с лазерной сваркой. В металле ЗТВ сварных соединений, выполненных одной лишь лазерной сваркой, отсутствует участок крупного зерна, что может приводить к снижению ударной вязкости металла в ЗТВ. В ЗТВ сварных соединений, выполненных лазерно-дуговой сваркой, участок крупного зерна присутствует.

5. Аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом по слою флюса обеспечивает наибольшие значения ударной вязкости металла шва и ЗТВ сплава Т110 без применения присадочного материала.

1. Пат. 40087 Україна. Високоміцний титановий сплав / В. М. Замков, В. П. Топольський, М. П. Тригуб та ін. – Оpubл. 16.06.2003; Бюл. № 6.
2. Исследование механических свойств кованных полуфабрикатов опытного титанового сплава Т110 / С. Л. Антонок, В. Н. Замков, В. Ф. Топольский и др. // Современная электрометаллургия. – 2003. – № 3. – С. 30–33.
3. Laser welding of titanium alloys / В. Е. Paton, V. D. Shelyagin, S. V. Akhonin / The Paton Welding J. – 2009. – № 7. – Р. 30–34.
4. Особенности лазерно-дуговой сварки титановых сплавов / В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, С. В. Ахонин и др. // Автомат. сварка. – 2012. – № 12. – С. 36–40.
5. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, В. Е. Блашук и др. – Киев: Наук. думка, 1986. – 240 с.
6. Изыскание присадочного материала для сварки ( $\alpha+\beta$ )-титановых сплавов / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, Н. А. Кушниренко и др.: Сб. науч. тр. «Актуальные проблемы сварки цветных металлов». – Киев: Наук. думка, 1980. – С. 314–320.
7. Влияние термической обработки на работоспособность сварных соединений сплава ВТ23 / В. Н. Замков, В. Ф. Топольский, И. К. Тяпко и др. // Автомат. сварка. – 1993. – № 4. – С. 25–27.
8. А. с. 439363 СССР. Сварочный флюс / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, В. П. Прилуцкий и др. – Бюл. № 30.

Поступила в редакцию 28.10.2013