



## ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

**В. Д. ШЕЛЯГИН**, канд. техн. наук, **В. Ю. ХАСКИН**, **С. В. АХОНИН**, доктора техн. наук,  
**В. Ю. БЕЛОУС**, канд. техн. наук,  
**И. К. ПЕТРИЧЕНКО**, **А. В. СИОРА**, **А. Н. ПАЛАГЕША**, **Р. В. СЕЛИН**, инженеры  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработаны приемы и выбраны режимы гибридной лазерно-дуговой сварки титановых сплавов. Установлено, что гибридная лазерно-дуговая сварка позволяет получать соединения низко- и среднелегированных титановых сплавов со свойствами, не уступающими свойствам основного металла. Ударная вязкость сварных соединений высоколегированного титанового сплава Т110, выполненных гибридной лазерно-дуговой сваркой, значительно выше, чем соединений, выполненных лазерной сваркой.

*Ключевые слова:* гибридная лазерно-дуговая сварка, лазерное излучение, дуга с неплавящимся электродом, титановые сплавы, эксперименты, режимы, металлография, структуры, механические свойства

В настоящее время титановые сплавы применяют при производстве ответственных конструкций в авиакосмической, химической, приборостроительной промышленности и судостроении. Из них выполняют такие ответственные изделия, как стрингерные панели для самолетов, элементы ракетной техники, емкости для химической промышленности, некоторые корпусные изделия и др. [1]. Зачастую конструкторские решения, заложенные в эти изделия, требуют применения сварочных процессов. На практике более 90 % всех швов выполняется аргонодуговой и электронно-лучевой сваркой [2].

Однако эти способы сварки имеют недостатки как технологического (малую плотность энергии в плазме дугового разряда), так и экономического характера (высокую стоимость даже при малых габаритах большинства вакуумных камер для электронно-лучевой сварки). В последнее время расширяется применение лазерной сварки, имеющей такие преимущества, как высокую плотность энергии в лазерном луче, высокую производительность и прецизионность обработки [3]. Существенным недостатком процесса лазерной сварки является значительная себестоимость оборудования при его реализации. Как показано в работе [4], одним из путей снижения этого показателя может являться частичная замена лазерной мощности дуговой. Кроме того, существуют и технологические ограничения лазерной сварки, связанные с высокой отражающей способностью поверхности многих конструкционных металлов и сплавов, которые могут быть преодолены при

использовании гибридного лазерно-дугового процесса.

Работы по гибридной лазерно-дуговой сварке сталей и алюминиевых сплавов ведутся уже около трех десятков лет (например [5]), а в последние десять лет обсуждается возможность ее применения для титановых сплавов [6], накапливаются соответствующие экспериментальные данные. Особенно актуальным является определение влияния термического цикла гибридной лазерно-дуговой сварки на свойства соединений высокопрочных титановых сплавов таких, например, как Т110. В частности, в условиях эксперимента, описанного в работе [7], лазерная сварка сплава Т110 приводила к ухудшению его механических свойств по сравнению с основным металлом.

Целью данной работы является изучение особенностей лазерно-дуговой сварки соединений титановых сплавов, таких как низколегированный титановый сплав ВТ6 и высокопрочный Т110, а также оценка механических свойств полученных сварных соединений.

Для решения этой задачи авторами была реализована технологическая схема процесса гибридной лазерно-дуговой сварки, приведенная на рис. 1. Источником излучения служил Nd:YAG-лазер модели DY 044 (фирма «Rofin Sinar», Германия) мощностью до 4,4 кВт с длиной волны 1,06 мкм, а источником сварочного тока — источник питания ВДУ-601 УЗ для автоматической сварки вольфрамовым электродом. Согласно этой схеме вольфрамовый электрод располагается перед лазерным лучом. Такое сочетание лазера и сварки ТИГ позволяет увеличить проплавливающую способность процесса сварки, а также допускает несложное введение присадочной проволоки в зону сварки. Для реализации этой схемы была разработана сварочная головка, обеспечивающая

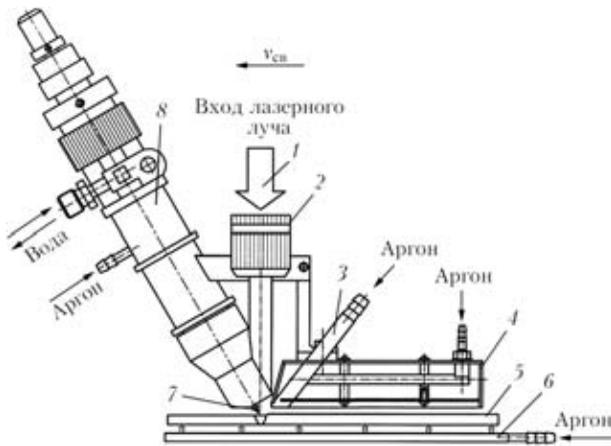


Рис. 1. Схема гибридного лазерно-дугового процесса сварки: 1 — лазерный луч; 2 — устройство для фокусировки; 3 — приспособление для дополнительной подачи защитного газа; 4 — приспособление для защиты зоны сварки и остывающего металла шва и ЗТВ; 5 — свариваемый образец; 6 — приспособление для защиты обратной стороны соединения; 7 — вольфрамовый электрод; 8 — сварочная горелка для сварки ТИГ титана



Рис. 2. Внешний вид сварочной головки для лазерно-дуговой сварки титановых сплавов

подвод сфокусированного линзой (фокусное расстояние 300 мм) лазерного луча 1 и вольфрамового электрода 7 (диаметр 5 мм, угол заточки 30°) к определенной точке на поверхности свариваемого образца 5. Расстояние от конца электрода до поверхности свариваемого образца устанавливали порядка 3 мм. Аналогичным было расстояние от среза нижней части сварочной головки до образца. Заглубление фокальной плоскости лазерного луча под поверхность свариваемого образца варьировали в пределах 0...5 мм в зависимости от его толщины. Углы между нормалью к свариваемой поверхности и осями лазерного луча и электрода выбрали минимально возможными. Эксперименты показали, что для получения гибридного эффекта при сварке расстояние между осью лазерного луча и концом электрода должно составлять 1,0...1,5 мм. При расстоянии между осью лазерного луча и концом электрода менее 1 мм имеет место оплавление и разрушение рабочей части вольфрамового электрода. Если это расстояние более 3 мм, происходит повторное проплавление лазерным лучом закристаллизованного металла сварного шва после действия дуги вольфрамовым электродом. При этом нет существенного увеличения проплавляющей способности лазерно-дугового процесса.

Увеличение глубины проплавления достигалось за счет того, что первой по ходу сварки расположена дуга с неплавящимся электродом (рис. 2), что обеспечивало увеличение лазерного излучения, поглощаемого металлом, так как расплавленный металл имеет луч-

шую поглощательную способность, чем холодный [8]. Сварочный ток в ходе экспериментов изменяли в пределах 200...450 А, а мощность излучения Nd:YAG-лазера составляла 4,4 кВт. В качестве образцов использовали титановые сплавы ВТ1, ВТ6 и Т110 толщиной  $\delta = 10...13$  мм. Защитный газ (аргон) подавали как с верхней, так и с нижней сторон образца. Для обеспечения качественной защиты зоны сварки сварочную горелку оснастили устройством для дополнительного обдува хвостовой части сварочной ванны аргоном (рис.1, позиции 3, 4).

Проведенные эксперименты позволили установить, что лазерно-дуговым способом можно сваривать со сквозным проплавлением титановые сплавы толщиной 12 мм на скорости 22...24 м/ч при мощности излучения 4,4 кВт, сварочном токе 400 А и напряжении 12...14 В (рис. 3, а, 4, а, 5, а). Наплавки, выполненные на те же сплавы на указанных режимах отдельно лазерным и отдельно дуговым способами, имели глубину порядка 6 и 5 мм соответственно (рис. 3, б, 4, б, 5, б). Сравнение площадей поперечных сечений этих швов со швами, выполненными гибридным способом, позволяет утверждать, что при лазерно-дуговом процессе сварки наблюдается «гиб-

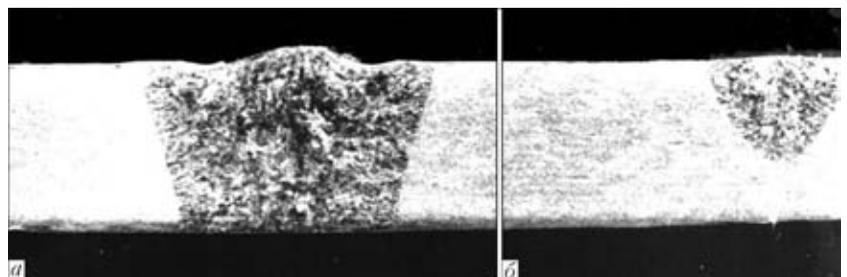


Рис. 3. Макроструктуры наплавки на титановом сплаве ВТ1 ( $\delta = 10$  мм): а — лазерно-дуговая сварка; б — лазерная сварка



Таблица 1. Параметры наплавки и ЗТВ при лазерной и лазерно-дуговой сварке

Сплав	Способ сварки	Форма наплавки	Глубина проплавления, мм	Ширина наплавки, мм			Ширина ЗТВ, мм		
				верх	средняя часть	корневая часть	верх	средняя часть	корневая часть
BT6	Лазерная		4,0	7,0	2,5	—	1,2	1,8	0,7
	Лазерно-дуговая		13,0 (сквозное)	12,0	5,0	2,3	1,8	4,3	2,3
T110	Лазерная		6,9	8,0	1,5	1,9	1,2	3,3	0,9
	Лазерно-дуговая		11,0	12,0	5,4	3,4	2,3	4,5	2,5

Таблица 2. Механические свойства сплава BT6 и его сварных соединений, выполненных лазерно-дуговой сваркой

Материал	Предел прочности, МПа	Предел пластичности, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>	
					шов	ЗТВ
Основной металл BT6 ( $\delta = 13$ мм)	888	815	13,6	30	39	
Сварное соединение	911	—	—	—	54	32

ридный» эффект. Он проявляется в неаддитивности суммы площадей сечений швов, выполненных лазерным и дуговым способами, по сравнению с площадью шва, выполненного гибридным

способом. Параметры наплавки на сплавы BT6 и T110 при лазерной и лазерно-дуговой сварке приведены в табл. 1.

К основным дефектам лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварки титановых сплавов относятся возможность образования внутренних пор в литом металле шва и неудовлетворительное формирование верхнего валика усиления. Последний дефект заключается в образовании подрезов с двух сторон шва и некотором увеличении самого валика усиления.

Металлографические исследования сварных швов сплавов BT6 и T110, выполненных лазерной сваркой, показали четко прослеживающуюся дендритную структуру, на фоне которой наблюдаются первичные  $\beta$ -зерна, вытянутые в направлении теплоотвода или же равноосные, имеется субструктура. При лазерно-дуговой сварке сплавов BT6 и T110 в шве образуются преимущественно вы-

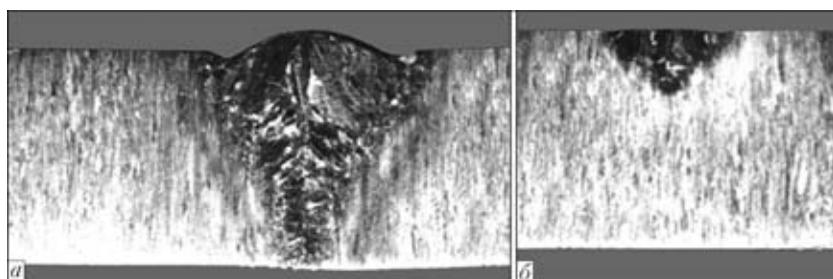
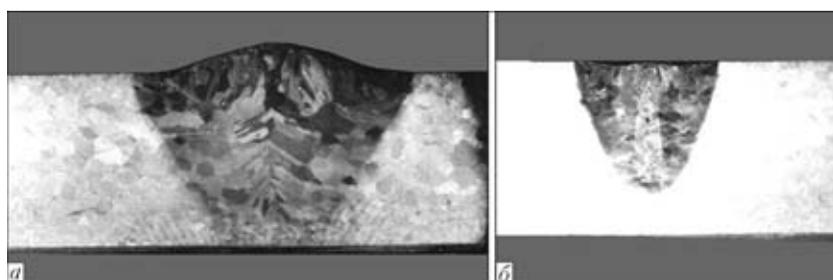
Рис. 4. Макроструктуры наплавки на титановом сплаве BT6 ( $\delta = 13$  мм): а — лазерно-дуговая сварка; б — лазерная сваркаРис. 5. Макроструктуры наплавки на титановом сплаве T110 ( $\delta = 13$  мм): а — лазерно-дуговая сварка; б — лазерная сварка

Таблица 3. Механические свойства сплава Т110 и его сварных соединений, выполненных лазерной и лазерно-дуговой сваркой

Материал	Предел прочности, МПа	Предел пластичности, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>	
					шов	ЗТВ
Основной металл Т110 ( $\delta = 13$ мм)	1130	999	6	5	38	
Сварное соединение:						
лазерно-дуговое	1180	—	—	—	15	23
лазерное	1131	—	—	—	6	13

тянутые в направлении теплоотвода  $\beta$ -зерна, и только в верхней части шва вблизи поверхности сформировались относительно мелкие равноосные зерна.

В отличие от сварного соединения сплава Т110, выполненного лазерной сваркой, ни в шве, ни в зоне термического влияния (ЗТВ) сварного соединения, выполненного лазерно-дуговой сваркой, не наблюдалось субструктуры, микроструктура была более однородной и равномерной. Изучение микроструктуры поперечных шлифов сварных соединений показало, что в выполненных лазерной сваркой швах имеются поры диаметром 0,01...0,035 мм, а в швах, выполненных лазерно-дуговой сваркой, поры не зафиксированы.

Проведенные механические испытания показали, что значения предела прочности сварных соединений титановых сплавов ВТ6 и Т110, выполненных лазерной и лазерно-дуговой сваркой, на 2...4 % больше значений предела прочности основного металла (табл. 2, 3), что, по мнению авторов, объясняется наличием в металле шва дендритной структуры, характерной для литого металла. Измерения ударной вязкости сварных соединений высоколегированного титанового сплава Т110, выполненных лазерно-дуговой сваркой, показали удовлетворительные значения.

В связи с особенностями лазерной и лазерно-дуговой сварки, характеризующимися испарительным механизмом образования парогазового канала, были проведены исследования сварных соединений на определение доли легирующих элементов в литом металле швов и сравнении ее с содержанием этих же элементов в основном металле. Исследования химической микронеоднородности в образцах сплава Т110, сваренных лазерным и лазерно-дуговым способами, проводились по алюминию, ниобию, цирконию, молибдену, ванадию, железу с помощью растрового микроскопа-микроанализатора модели SX-50 французской фирмы «Камека». В приборе использовался электронный зонд, состоящий из пучка электронов диаметром 1 мкм. Объем определяемой массы составлял 1...3 мкм<sup>3</sup> в зависимости от глубины проникновения зонда в исследуемый материал. Установлено, что как в случае лазерной,

так и в случае гибридной сварки, отклонение содержания исследуемых элементов лежало в пределах допустимого разброса легирующих элементов в марочном составе сплава. Следовательно, при сварке на указанных режимах опасность выгорания отдельных легирующих элементов сплава отсутствует.

### Выводы

1. Разработана конструкция сварочной головки для гибридной лазерно-дуговой сварки (луч + ТИГ) титановых сплавов, при которой лазерный луч расположен за сварочной дугой. Такая сварочная головка обеспечивает удовлетворительное качество защиты зоны сварки и остывающего металла сварного шва.

2. Установлено, что применение предложенной схемы лазерно-дуговой сварки при мощности лазерного луча 4,4 кВт и сварочном токе 400 А обеспечивает двукратное увеличение глубины проплавления по сравнению с результатами одной лишь лазерной сварки, выполненной при мощности 4,4 кВт. При этом как в случае лазерной, так и в случае гибридной сварки опасность выгорания легирующих элементов сплава отсутствует.

3. Разработаны технологические приемы и выбраны режимы лазерно-дуговой сварки, которые обеспечивают при мощности лазерного луча 4,4 кВт и скорости сварки 22...24 м/ч сквозное проплавление образцов титановых сплавов ВТ6 и Т110 толщиной до 13 мм.

4. Предел прочности сварных соединений титановых сплавов ВТ6 и Т110, выполненных лазерной и лазерно-дуговой сваркой, на 2...4 % больше значений предела прочности основного металла.

5. Лазерно-дуговая сварка имеет большую проплавляющую способность по сравнению со сваркой одним лишь лазерным лучом и позволяет получать сварные соединения высоколегированных титановых сплавов с удовлетворительной пластичностью и ударной вязкостью.

6. Проведенные исследования показали, что гибридная лазерно-дуговая сварка позволяет получать соединения низко- и среднелегированных титановых сплавов со свойствами, не уступающими свойствам основного металла.

1. *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов* / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, В. Е. Блащук и др. — 2-е изд., доп. и перераб. — Киев: Наук. думка, 1986. — 240 с.
2. *Электронно-лучевая сварка* / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко и др.; под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Наук. думка, 1987. — 255 с.
3. *Laser welding of titanium alloys* / В. Е. Paton, V. D. Shelyagin, S. V. Akhonin et al. // *The Paton Welding J.* — 2009. — № 7. — P. 30–34.
4. *Гибридная сварка излучением CO<sub>2</sub>-лазера и дугой плавящегося электрода в углекислом газе* / В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, В. П. Гарашук и др. // *Автомат. сварка.* — 2002. — № 10. — С. 38–41.
5. *TIG or MIG arc augmented laser welding of thick mild steel plate* / J. Matsuda, A. Utsumi, M. Katsumura et al. // *Joining and Materials.* — 1988. — 1, № 1. — P. 31–34.
6. *Ottimizzazione dei parametri di saldatura ibrida laser-arco della lega di titanio Ti6Al4V* / M. Brandizzi, C. Mezzacappa, L. Tricarico, A. A. Satriano // *Riv. ital. Saldat.* — 2010. — № 2. — S. 77–85.
7. *Лазерне зварювання конструкційних титанових сплавів* / В. Ф. Топольський, С. В. Ахонін, В. Д. Шелягин та ін. // *Теорія і практика металургії.* — 2010. — № 5/6. — С. 22–27.
8. *Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 5: Лазерная сварка металлов: Учеб. пос. для вузов* / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов / Под ред. А. Г. Григорьянца. — М.: Высш. шк., 1988. — 207 с.

Techniques were developed, and parameters were selected for hybrid laser-arc welding of titanium alloys. It was established that hybrid laser-arc welding makes it possible to produce the joints on low and medium titanium alloys with properties that are not inferior to those of the base metal. Impact toughness of the hybrid laser-arc welded joints on high titanium alloy T110 is much higher than that of the laser welded joints.

Поступила в редакцию 19.09.2012

РАЗРАБОТАНО В ИЭС

## ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ СВАРКА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ТОЛЩИНОЙ ДО 400 мм

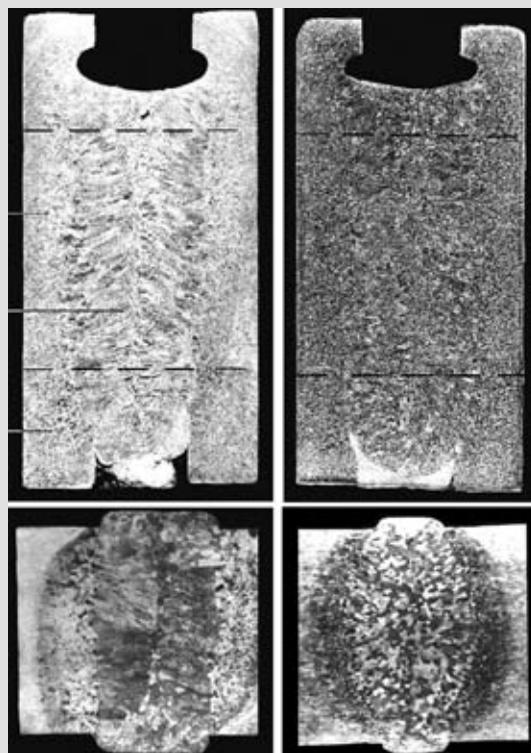
Технология предназначена для сварки деталей и узлов толщиной 40...400 мм из титана и его сплавов при выполнении стыковых, угловых и тавровых соединений.

Сварка осуществляется вертикальными швами за один проход без разделки кромок. Максимальная толщина свариваемого металла в месте стыка 400 мм при максимальной длине шва до 2 м и сварочном зазоре 22...30 мм. В зависимости от конструктивных особенностей изделий сварка может вестись с использованием проволочных электродов, плавящегося мундштука и пластинчатого электрода.

Отличительной особенностью технологии является использование электромагнитного воздействия на сварочную ванну, обеспечивающего высокое качество сварных соединений.

### Преимущества:

- возможность сварки изделий толщиной до 400 мм за один проход без разделки кромок;
- высокая производительность процесса сварки;
- мелкозернистая структура металла шва без пор, шлаковых включений, несплавлений и прочих дефектов;
- простота и надежность используемого технологического оборудования.



Макрошлифы сварных соединений, выполненных без электромагнитного воздействия (слева) и с воздействием (справа)