

ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Академик **Б. Е. ПАТОН**, **В. Д. ШЕЛЯГИН**, канд. техн. наук, **С. В. АХОНИН**, д-р техн. наук,
В. Ф. ТОПОЛЬСКИЙ, **В. Ю. ХАСКИН**, кандидаты техн. наук, **И. К. ПЕТРИЧЕНКО**, **А. В. БЕРНАЦКИЙ**,
Р. Н. МИЩЕНКО, **А. В. СИОРА**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Выбрана оптимальная схема газовой защиты при лазерной сварке, с использованием которой получены соединения ВТ1-0, ВТ6, СП15, ВТ22, ВТ23 и Т110. Установлена возможность лазерной сварки низко- и среднелегированных сплавов. Показано, что для высоколегированных титановых сплавов необходимо провести дальнейшее усовершенствование технологии лазерной сварки.

Ключевые слова: лазерная сварка, титановые сплавы, газовая защита, параметры режима, стыковые соединения, механические свойства, коррозионная стойкость под напряжением

Титановые сплавы широко применяются в авиационной и космической технике, судостроении, химическом машиностроении, энергетике и многих других областях современной промышленности [1]. Так, в самолетостроении используют стрингерные панели, которые получают путем приваривания прорезными швами ребер жесткости к цельному полотнищу. Для ответственных длинномерных конструкций морских судов применяют сварные тавровые балки из титанового сплава. Решение указанных задач усложняется большими размерами и малой толщиной стенок свариваемых деталей. В связи с этим для изготовления тонколистовых конструкций из титановых сплавов обычно применяют электронно-лучевую сварку (ЭЛС) [2]. Однако такой способ сварки не всегда приемлем для крупногабаритных конструкций в связи с необходимостью применения вакуумных камер. Традиционные дуговые способы сварки зачастую имеют невысокую производительность и могут приводить к образованию значительных поводов и короблению сварных конструкций [3]. Лазерная сварка позволяет получать узкие швы с малой зоной термического влияния (ЗТВ) без использования сложных вакуумных камер со скоростью, в 2...3 раза (и более) превышающую скорость дуговой сварки [4].

Первые попытки применения лазерного излучения для сварки титановых сплавов предпринимались еще в начале 1970-х годов, в частности, в ИЭС им. Е. О. Патона [5]. Было определено, что в связи с активным химическим взаимодействием жидкого металла сварочной ванны с окружающей средой необходима надежная защита инертным газом. Из работы [5] следует, что для защиты металла ванны применение гелия вместо

аргона позволяет повысить глубину проплавления металла более чем на 50 %.

В начале 1980-х годов уже были предприняты первые попытки внедрения в промышленность технологии лазерной сварки для изготовления титановых изделий. В этом плане следует отметить работы ФИАЭ им. И. В. Курчатова. В 1983 г. на ВО «Балтийский завод» была внедрена промышленная технология лазерной сварки специального теплообменного модуля из титанового сплава. С помощью лазера выполняли вваривание трубок с толщиной стенки до 2,5 мм в трубную доску [6]. В работе [7] также отмечена возможность применения лазерного излучения для сварки титановых изделий.

Цель настоящей работы заключалась в оптимизации технологического процесса лазерной сварки по критериям механических характеристик сварных соединений титановых сплавов путем подбора скорости процесса сварки при фиксированной мощности лазерного излучения. Для достижения этой цели создана система газовой защиты сварочной ванны и той ее хвостовой части, в которой металл имел температуру свыше 200 °С, поскольку именно при такой температуре возможно насыщение верхнего слоя металла шва и основного металла азотом воздуха [1]. В качестве материала образцов выбраны технический титан ВТ1-0, среднелегированный β -стабилизаторами сплав ВТ6, и высоколегированные сплавы СП15, ВТ22, ВТ23, Т110 толщиной $b = 5,0...7,5$ мм. Химический состав этих сплавов приведен в табл. 1.

В ходе экспериментов сваривали стыковые соединения пластин размером $300 \times 50 \times b$ мм с применением Nd:YAG-лазера модели DY 044 (фирмы «Rofin Sinar», Германия) мощностью до 4,4 кВт и входящий в состав сварочной головки объектив с фокусным расстоянием $F = 300$ мм. Излучение от лазера к объективу передавалось по оптическому волокну диаметром 600 мкм. В процессе



Таблица 1. Химический состав (мас. %) основного металла свариваемых образцов

Материал	Al	Mo	V	Fe	Cr	Nb	Zr	O ₂	N ₂	H ₂
BT1-0	0,40	—	—	0,15	—	—	—	0,10	0,035	0,008
BT6	6,35	—	4,20	—	—	—	—	0,15	0,050	0,012
СП15	4,50	3,18	3,30	—	—	4,22	1,9	0,16	0,028	0,002
BT22	6,00	4,80	5,10	1,00	1,0	—	—	0,18	0,050	0,015
BT23	4,50	2,00	4,50	0,60	1,0	—	—	0,17	0,004	0,018
T110	4,90	0,90	1,25	1,61	—	4,74	0,5	0,13	0,040	0,002

сварки перемещалась сварочная головка с системой защиты. Во всех случаях нижняя (корневая) часть сварного шва была защищена аргоном, расход которого составлял 7 л/мин. Он подавался по трубке, расположенной в прижимном приспособлении. Верхняя часть шва (ванна расплава и ее хвостовая часть) была защищена с помощью сопла сварочной головки.

С целью оптимизации конструкции защитного сопла и выбора вида защитного газа проведена серия предварительных экспериментов. Вначале испытаний использовали схему лазерной сварки, представленную на рис. 1. Установлено, что подача защитного газа (аргона или гелия) перед ходом сварочной головки приводит к подосу воздуха в зону сварки, что является недопустимым. Затем опробована схема, показанная на рис. 2. Коаксиальная подача газа (аргона или гелия) позволила достаточно надежно защитить зону сварки, но при этом значительно (до 50 %) снизилась глубина проплавления металла по сравнению с проплавлениями, полученными при сварке по схеме, представленной на рис. 1. Кроме того, выясни-

лось, что схема сварки, представленная на рис. 2, не обеспечивает защиту остывающего металла от окружающего воздуха. В результате происходило насыщение тонкого (около 0,1...0,3 мм) поверхностного слоя металла шва азотом с образованием нитрида титана, имеющего золотистый цвет.

Для устранения недостатков газовой защиты обеих схем разработана система дифференциальной подачи ламинарных газовых потоков, защищающих сварочную ванну и остывающий металл хвостовой зоны от воздействия воздуха (рис. 3). Такая схема сварки позволяет устранять указанные выше недостатки двух предыдущих схем. В ходе исследования ее технологических возможностей установлено, что подача аргона для защиты сварочной ванны приводит к частичному экранированию лазерного излучения образующимся над ванной плазменным факелом, что значительно снижает глубину проплавления. Использование гелия позволяет устранить данный эффект. В связи с этим для дальнейшего проведения экспериментов использована схема сварки, показанная на рис. 3, в которой в качестве защитного газа для сварочной ванны использовали гелий (расход $Q_1 = 7$ л/мин), а для защиты остывающего

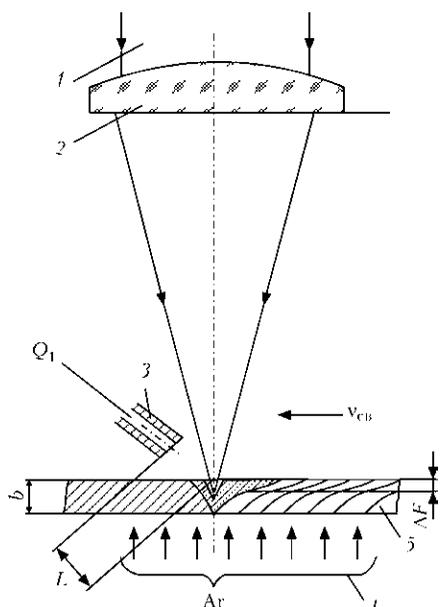


Рис. 1. Схема лазерной сварки с подачей газа спереди хода сварочной головки: 1 — лазерное излучение; 2 — фокусирующий объектив; 3 — сопло для подачи защитного газа; 4 — защита корня шва; 5 — образец; Q_1 — расход защитного газа; $v_{св}$ — скорость сварки; ΔF — заглупление фокуса

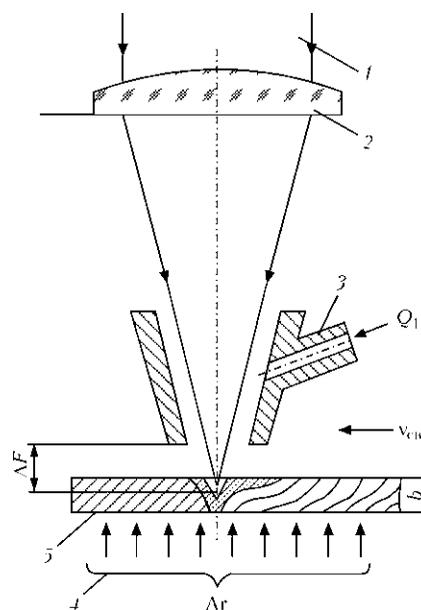


Рис. 2. Схема лазерной сварки с коаксиальной подачей защитного газа (здесь и на рис. 3 1–5 обозначения — см. рис. 1)

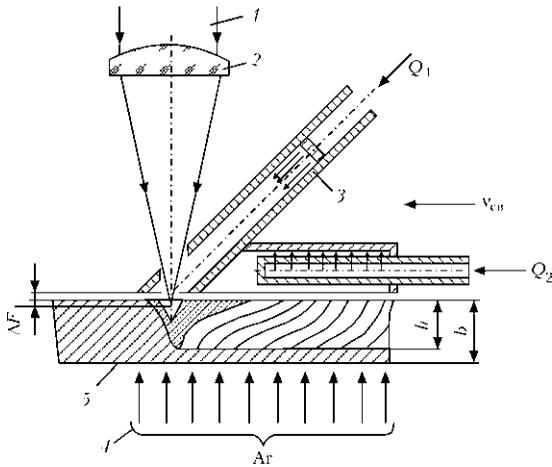


Рис. 3. Схема лазерной сварки с дифференцированной защитой сварочной ванны и остывающего металла ламинарными газовыми потоками

металла — аргон (расход $Q_2 = 12$ л/мин). По критерию полного проплавления металла с формированием узкого (0,5...1,0 мм) корня шва (мощность излучения $P = 4,0...4,3$ кВт) выбраны оптимальные параметры режимов сварки (табл. 2).

После сварки все образцы проходили рентгеноскопический контроль, который показал, что в металле швов, выполненных по оптимальной схеме и на оптимальных режимах, присутствуют только единичные поры (рис. 4, а). Отклонение от оптимальной технологии сварки приводит к появлению сплошной цепочки пор, расположенной по оси шва (рис. 4, б).

В металле швов, выполненных лазерной сваркой, исследовали содержание газовых примесей (табл. 3). Газовый анализ показал, что использование в качестве защитной среды гелия и аргона обеспечивает содержание кислорода, азота, водорода в металле швов на уровне основного металла, соответствует требованиям ГОСТ 19807–91 и ASTM, а для Т110 — ТУУ 27.4.05416923.071–2005.

Для снятия остаточных сварочных напряжений и стабилизации структуры осуществлен отжиг образцов при температуре 650...950 °С (в зависимости от марки сплава). Сварные соединения подвергали механическим испытаниям на растяжение и ударный изгиб в состоянии после сварки и отжига. Результаты механических испытаний представлены в табл. 4.

Таблица 2. Параметры режимов лазерной сварки

Материал	b , мм	P , кВт	$v_{св}$, м/ч	ΔF , мм
BT1-0	5,0	4,1	48	2,0
BT6	7,5	4,3	36	2,0
СП15	6,5	4,0	42	2,0
BT22	6,5	4,2	30	2,0
BT23	6,0	4,0	42	1,0
T110	7,0	4,0	42	2,0

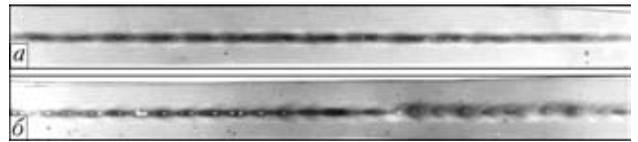


Рис. 4. Рентгенограммы сварных соединений сплава BT6, полученных лазерной сваркой на оптимальном (а) и неоптимальном режимах (б)

Таблица 3. Содержание (мас. %) газовых примесей в швах, выполненных лазерной сваркой

Материал	O ₂	N ₂	H ₂
BT1-0	$\frac{0,12}{0,13}$	$\frac{0,040}{0,041}$	$\frac{0,012}{0,011}$
BT6	$\frac{0,15}{0,10}$	$\frac{0,050}{0,045}$	$\frac{0,013}{0,011}$
BT22	$\frac{0,18}{0,17}$	$\frac{0,050}{0,050}$	$\frac{0,014}{0,012}$
BT23	$\frac{0,17}{0,20}$	$\frac{0,045}{0,050}$	$\frac{0,017}{0,016}$
СП15	$\frac{0,14}{0,13}$	$\frac{0,043}{0,041}$	$\frac{0,016}{0,015}$
T110	$\frac{0,15}{0,12}$	$\frac{0,060}{0,045}$	$\frac{0,013}{0,013}$

Примечание. В числителе приведено содержание газовых примесей в шве, в знаменателе — в ЗТВ.

Высокие показатели механических свойств, удовлетворяющие требованиям нормативных документов, имели сварные соединения технического титана BT1-0 и сплава BT6, полученные лазерной сваркой. Коэффициент стабильности β -фазы сплава BT6 составлял 0,3. Сварные соединения сплавов с коэффициентом стабильности β -фазы 0,6 и выше (СП15, BT23, T110, BT22) проявили высокую чувствительность к термическому циклу

Таблица 4. Механические свойства соединений титановых сплавов, выполненных лазерной сваркой

Материал	Сварное соединение			Основной металл	
	σ_B , МПа	KCV , Дж/см ²		σ_B , МПа	KCV_{2} , Дж/см ²
		Шов	ЗТВ		
BT1-0	$\frac{460}{440}$	$\frac{140}{150}$	$\frac{130}{145}$	460	150
BT6	$\frac{1010}{980}$	$\frac{30}{35}$	$\frac{34}{38}$	980	45
СП15	$\frac{1040}{1030}$	$\frac{12}{19}$	$\frac{18}{30}$	1030	43
BT23	$\frac{1050}{1020}$	$\frac{8}{16}$	$\frac{9}{21}$	1050	31
T110	$\frac{1080}{1050}$	$\frac{12}{13}$	$\frac{19}{20}$	1100	38
BT22	$\frac{1070}{1040}$	$\frac{8}{9}$	$\frac{11}{12}$	1050	30

Примечание. В числителе приведены данные, полученные после сварки, в знаменателе — после отжига.



Рис. 5. Микроструктура металла швов сварных соединений титановых сплавов, выполненных лазерной сваркой: а — ВТ6 (Х200); б — ВТ23 (Х400); в — Т110 (Х400)

Таблица 5. Механические свойства сварных соединений титанового сплава ВТ6, полученных различными способами сварки

Способ сварки	σ_B , МПа	KCV, Дж/см ²		Место разрушения
		Шов	ЗТВ	
АДС	940	33	34	Шов
ЭЛС	970	34	31	ЗТВ
Лазерный	980	35	36	» »

Примечание. Механические свойства основного металла: $\sigma_B = 998$ МПа; $\sigma_{0,2} = 970$ МПа; $\delta = 12\%$; $\psi = 24\%$; KCV 42 Дж/см².

Таблица 6. Склонность сварных соединений сплава ВТ6 к коррозионному растрескиванию под напряжением

Способы сварки	№ образца	Время до появления коррозионной трещины, ч	Общее время исследований, ч	Место разрушения
Основной металл	1	Не выявлено	790 (воздух)	Без разрушений
	2	»	790	
	3	»	790	
	4	»	790	
	5	»	790	
АДС	1	Не выявлено	790 (воздух)	»
	2	107	107	Шов
	3	Не выявлено	790	Без разрушений
	4	264	264	ЗТВ
	5	Не выявлено	790	Без разрушений
ЭЛС	1	»	790 (воздух)	»
	2	»	790	
	3	330	330	ЗТВ
	4	350	350	
	5	Не выявлено	790	Без разрушений
Лазерная сварка	1	»	790 (воздух)	»
	2	»	790	
	3	»	790	
	4	504	504	
	5	Не выявлено	790	

лазерной сварки. Как после сварки, так и после отжига структура металла шва и ЗТВ в этих сплавах мелкодисперсная, что обеспечило равнопрочность сварных соединений с основным металлом. Однако уровень ударной вязкости металла швов и ЗТВ высоколегированных титановых сплавов был неудовлетворительным как после сварки, так и после отжига.

Если металл сварного шва и ЗТВ сварного соединения ВТ1-0 и ВТ6, выполненного лазерной сваркой, отличается грубоигльчатой структурой (рис. 5, а), то аналогичные зоны сварных соединений высоколегированных сплавов имеют очень дисперсную внутризеренную структуру (рис. 5, б, в). Эти структурные отличия являются одной

из причин существенного снижения ударной вязкости высоколегированных сплавов по сравнению с техническим титаном ВТ1-0 и сплавом ВТ6, в которых при разрушении путь трещины извилистый. В высоколегированных сплавах с дисперсной структурой трещины распространяются по траектории, близкой к прямолинейной, на что требуется меньше энергии, чем в случае ВТ1-0 и ВТ6 [8].

В дальнейшем целесообразно провести усовершенствование технологии лазерной сварки высоколегированных титановых сплавов параллельно с поиском оптимальных режимов термической обработки сварных соединений, выполненных лазерной сваркой, с целью повышения их пластических характеристик.

Значительный интерес представляло сравнение результатов исследований соединений сплава ВТ6, полученных лазерной и другими способами сварки. Для этого параллельно со сварными соединениями сплава ВТ6, полученными лазерной сваркой, исследовали соединения этого сплава, полученные аргодуговой сваркой (АДС) и ЭЛС [9, 10].

Стыковые соединения пластин сваривали на установке УЛ-144 для ЭЛС (энергоблок ЕЛА 60/60) и с помощью промышленного оборудования для АДС титана вольфрамовым электродом. В последнем случае использовали флюс марки АНТ-25А. В качестве защитного газа при лазерной сварке применяли гелий и аргон, а при АДС — аргон. Во всех случаях режимы сварки обеспечивали выполнение швов за один проход без разделки кромок и применения присадочной проволоки. Несмотря на то, что погонная энергия при лазерной сварке была меньше (2,43 кДж/см), чем при ЭЛС (3,11 кДж/см) и АДС (4,77 кДж/см) в 1,3...2,0 раза, показатели прочности сварных соединений имели незначительные отличия и были близкими по значению к аналогичным характеристикам основного металла (табл. 5). Ударная вязкость металла шва и ЗТВ составляла 70...80 % от КСУ основного металла, что во всех случаях удовлетворяло требованиям нормативных документов и технологических инструкций на титановый сплав ВТ6. Склонность сплава ВТ6 и его сварных соединений к коррозионному растрескиванию под напряжением определяли в растворе метилового спирта с добавлением 0,4 % соляной кислоты. Испытания проводили при комнатной температуре в течение 790 ч. Количество образцов в каждой партии составляло 5 шт. Один из них (контрольный) под № 1 в каждой партии (табл. 6), испытывали на воздухе, другие — в агрессивной среде. В соответствии со стандартом, если все образцы партии находились в коррозионной среде под напряжением в течение 100 ч и не растрескались, то сплав или сварное соединение считается стойким к коррозионному растрескиванию под напряжением. Результаты коррозионных испытаний соединений сплава ВТ6, представлены в табл. 6. Анализ полученных результатов показал, что соединения сплава ВТ6, полученные различными способами сварки по оптимизированным технологиям, отличаются стойкостью к коррозионному растрескиванию.

Выводы

1. Выбраны оптимальные схемы защиты металла шва и состав защитной среды при лазерной сварке титановых сплавов, а для технического титана ВТ1-0 и сплава ВТ6 — оптимальные режимы лазерной сварки. Определено, что при лазерной сварке технического титана ВТ1-0 и сплава ВТ6 для защиты металла шва необходимо применять гелий, а для корня шва и остывающих участков основного металла — аргон.

Optimum scheme of gas shielding in laser welding was selected, allowing producing joints of VT1-0, VT6, VT22, VT23 and T110 alloys. Feasibility of laser welding of low- and medium-alloyed alloys has been established. It is shown that it is necessary to improve the technology of laser welding for high-alloy titanium alloys.

2. Прочность сварных соединений сплава ВТ6, полученных лазерной сваркой, находится на уровне основного металла, а ударная вязкость металла швов и ЗТВ составляет 70 % от КСУ ОМ.

3. Сварные соединения сплава ВТ6, полученные по усовершенствованным технологиям АДС по флюсу, ЭЛС, лазерной сварки, отвечают требованиям нормативных документов и являются стойкими к коррозионному растрескиванию под напряжением, хотя их коррозионная стойкость уступает основному металлу.

4. Необходимо дальнейшее усовершенствование технологии лазерной сварки и оптимизация режимов термической обработки сварных соединений высоколегированных титановых сплавов.

Авторы статьи выражают благодарность д-ру техн. наук С. Г. Полякову и сотрудникам его отдела за консультации и проведение работ по исследованию коррозионной стойкости под напряжением сварных соединений титанового сплава ВТ6.

1. *Металлургия* и технология сварки титана и его сплавов / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, В. Е. Блащук и др. — 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. *Технология* электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.
4. *Лазерная техника и технология: В 7 кн. Кн. 5: Лазерная сварка металлов: Учеб. пособие для вузов* / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов / Под ред. А. Г. Григорьянца. — М.: Высш. шк., 1988. — 207 с.
5. *Сварные швы на стали и титане, выполненные лазером* / О. А. Величко, В. П. Гаращук, И. В. Молчан и др. // Автомат. сварка. — 1974. — № 10. — С. 19–21.
6. *Журов Н. В., Мильруд С. Р.* Некоторые технологические особенности лазерной сварки трубных соединений // Использование высококонцентрированных источников энергии в сварочном производстве: Материалы краткосрочного семинара, г. Ленинград, 20–21 дек. 1983 г. — Л.: ЛДНТП, 1983. — С. 34–40.
7. *Замков В. Н., Прилуцкий В. П., Новиков Ю. К.* Достижения в области технологии сварки титана // Автомат. сварка. — 1993. — № 5. — С. 25–27.
8. *Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов* / Е. А. Борисова, Г. А. Бочвар, М. Я. Брун и др. — М.: Металлургия, 1980. — 464 с.
9. *Замков В. Н., Прилуцкий В. П.* Технологические возможности АДС титана по флюсу // Актуальные проблемы сварки цветных металлов: Докл. I Всесоюз. конф. «Актуальные проблемы сварки цветных металлов», г. Киев, 21–23 нояб. 1978 г. — Киев: Наук. думка, 1980. — С. 300–301.
10. *Влияние* способа сварки плавлением на свойства соединений сплава Ti–6Al–4V / В. Н. Замков, В. П. Прилуцкий, И. К. Петриченко, В. Ф. Топольский // Автомат. сварка. — 2001. — № 4. — С. 3–7.

Поступила в редакцию 08.04.2009