

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДОРОДА В СВАРНОМ ШВЕ

© 2019

- В. И. Муравьев** доктор технических наук, профессор-консультант кафедры «Машиностроение и металлургия»; Комсомольский-на-Амуре государственный университет; vmuravyev@mail.ru
- П. В. Бахматов** кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Машиностроение и металлургия»; Комсомольский-на-Амуре государственный университет; mim@knastu.ru
- В. В. Григорьев** ведущий инженер кафедры «Машиностроение и металлургия»; Комсомольский-на-Амуре государственный университет; grigorev.vlv@gmail.com
- О. Г. Шакирова** доктор химических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология переработки нефти и полимеров»; Комсомольский-на-Амуре государственный университет tpnp@knastu.ru
- С. А. Исхаков** начальник спектральной лаборатории; филиал ПАО «Авиационная холдинговая компания «Сухой» Комсомольский-на-Амуре авиационный завод имени Ю.А. Гагарина; mim@knastu.ru

Приведены результаты исследования распределения водорода в сварных соединениях, выполненных электронно-лучевой сваркой титановых сплавов ВТ20 и ВТ23. Распределение водорода в сечении сварных соединений измерялось в зоне сварного шва, термического влияния и в основном металле посредством спектрального анализа с применением низковольтного импульсного разряда на спектрографе ИСП-51. Установлено, что пики водорода в неразъёмных соединениях, выполненных электронно-лучевой сваркой, в отличие от аргонодуговой сварки находятся не только в зоне термического влияния, но и в центральной части сварного соединения. Химическим анализом изломов неразъёмных соединений, исследованных с применением сканирующего растрового электронного микроскопа Hitachi S-3400N, установлено, что поры в сварных соединениях, выполненных электронно-лучевой сваркой, возникают вследствие десорбции в расплав капиллярно-конденсированных загрязнений, находящихся в дефектах поверхности торцов кромок, и избирательного плавления по границам зёрен из-за недостаточных температурных условий плавления по целному зерну. Выявлено, что на появление изменений содержания водорода, с образованием дефектов, оказывают влияние температурные условия разогрева свариваемых кромок, скорость сварки, толщина свариваемых заготовок.

Титановые сплавы; электронно-лучевая сварка; водород в сварных соединениях; порообразование; капиллярно-конденсированная влага; фрактограммы изломов сварных соединений; дефекты поверхности стыкуемых кромок.

Цитирование: Муравьев В.И., Бахматов П.В., Григорьев В.В., Шакирова О.Г., Исхаков С.А. Исследование влияния электронно-лучевой сварки титановых сплавов на распределение водорода в сварном шве // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18, № 4. С. 157-168. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-4-157-168

Введение

Одним из наиболее перспективных материалов для многих областей применения в авиакосмической технике являются титановые сплавы вследствие их высокой удельной прочности, сопротивления усталости, вязкости разрушения, коррозионной стойкости, хорошей свариваемости. Однако свойства сварных соединений титановых сплавов

ниже, чем у основного деформированного металла, и к тому же титановые сплавы склонны к порообразованию при сварке и образованию холодных трещин после сварки [1-3].

Наиболее перспективной по сравнению с традиционными методами сварки плавлением титановых конструкций, особенно больших толщин (до 200 мм и более) [4], является электронно-лучевая сварка (ЭЛС). Преимуществами ЭЛС перед другими методами сварки являются: более надёжная защита зоны сварки от газов атмосферы; малая ширина зоны термического влияния (ЗТВ) и малая ширина шва; возможность однопроходной сварки больших толщин. При ЭЛС рабочее расстояние «электронная пушка – изделие» можно изменять в значительных пределах без существенного изменения параметров шва. Рабочее расстояние выбирается в пределах 50 – 120 мм для низковольтных пушек и 50 – 500 мм – для высоковольтных. При этом изменение рабочего расстояния в процессе сварки на 1 – 5 мм не оказывает существенного влияния на качество соединения. Отклонение потока электронов в магнитном поле осуществляется практически безынерционно, что даёт возможность перемещать электронный луч по сложным контурам по программе с использованием электронно-вычислительной техники. Имеется существенное (в 8 – 10 раз) снижение энергетических затрат по сравнению с другими дуговыми методами. Существует возможность локальной термической обработки расфокусированным лучом непосредственно после сварки. Однако ЭЛС титановых сплавов сопровождается образованием таких дефектов в металле шва, которые присущи только ЭЛС [5-7].

Основной дефект швов при ЭЛС титана и его сплавов – пористость, которая может снижать предел выносливости до 60% по сравнению с основным металлом [8].

В работе [9] показано, что газовые примеси в титане (в первую очередь водород) не только влияют на механические свойства сварных соединений и работоспособность конструкций в целом, но и являются причиной пористости швов. Из всего многообразия гипотез порообразования в сварных швах титановых сплавов наиболее достоверной и постоянно подтверждаемой другими исследователями [10] является гипотеза попадания при аргонодуговой сварке (АрДЭС) готовых зародышей в расплавленную ванну из заваренных перед фронтом сварочной ванны дефектов, заполненных загрязнениями (влаги и др.).

Исследований по распределению водорода в сварном шве, выполненного ЭЛС, мало, и в основном оценка осуществляется по результатам АрДЭС. В работе [11] рассматривается механизм порообразования при лазерной сварке, который распространяют на ЭЛС. Но при этом отсутствуют данные по распределению водорода в сварном шве после ЭЛС.

Целью настоящей работы является исследование распределения водорода в сварном шве (СШ) и околошовной зоне титановых сплавов после ЭЛС.

Методика проведения исследований

Исследования проводили на образцах из сплавов ВТ23 и ВТ20, толщина заготовок для сплава ВТ23 составляла 50 и 70 мм, для ВТ20 – 60 мм. ЭЛС заготовки толщиной 50 мм производили без подготовки поверхности под сварку на установке 30Е3000. Поверхность кромок темплетов из сплавов ВТ23 и ВТ20 с толщинами 70 и 60 мм подготавливалась по базовой технологии. ЭЛС выполняли на электронно-лучевых установках (ЭЛУ): 30Е3000 и КЛ-144. Режимы ЭЛС темплетов приведены в табл. 1.

Раскрой сварных темплетов производили на автоматическом лентопильном станке фирмы Danobat с применением охлаждающей эмульсии.

Исследовали фрактографию изломов и анализ химического состава в зонах сплавления, порах и выплесках на сканирующем растровом электронном микроскопе Hitachi S3400N.

Таблица 1. Режимы электронно-лучевой сварки

ЭЛУ	Марка сплава	Протяжённость шва, мм	Толщина заготовки, мм	Режимы сварки			
				I_w , мА	I_f , мА	F , мм	$V_{св}$, мм/с
30E3000	BT23	130	50	415	600	200	7
КЛ-144	BT20	60	60	470			10
КЛ-144	BT23	93	70	470			10

Примечание:

I_w – ток сварки; I_f – ток фокусировки; F – расстояние от торца пушки до детали; $V_{св}$ – скорость сварки.

Из всего многообразия методов распределения водорода в СШ и ЗТВ выбран спектральный метод с применением низковольтного импульсного разряда, включающий так называемый «метод 3-х эталонов» [12] (для построения калибровочного графика) на спектрографе ИСП-51 в соответствии с ОСТ 90034-81.

Для возбуждения спектра водорода [13] использовали низковольтный импульсный разряд при ёмкости 2000 МкФ и рабочем напряжении 220 В. Градуировочные графики строились в координатах $S - \lg C$, где S – абсолютное почернение линий водорода $\lambda 6562,8 \text{ \AA}$. В качестве линий сравнения был использован фон около линий кремния Si $\lambda 6347$, Si $\lambda 6371$. Для построения графика использовался комплект стандартных образцов.

Результаты исследований и их обсуждение

Как видно из данных рис. 1 – 3, распределение водорода в сварном шве титановых сплавов, выполненных ЭЛС, имеет сложный характер и в значительной степени отличается от распределения водорода в сечении сварного шва, выполненного АрДЭС в среде защитных газов [14]. При этом изостерические давления в металле, возникающие в отдельных участках сварного соединения в связи с неравномерностью нагрева и, следовательно, растворимости, вызывают возникновение направленных диффузионных потоков водорода, что приводит к появлению пиков его концентрации у зоны сплавления. В рассматриваемом случае появление пиков наблюдается не только в зоне сплавления, но и в центральной части сварного шва (рис. 1).

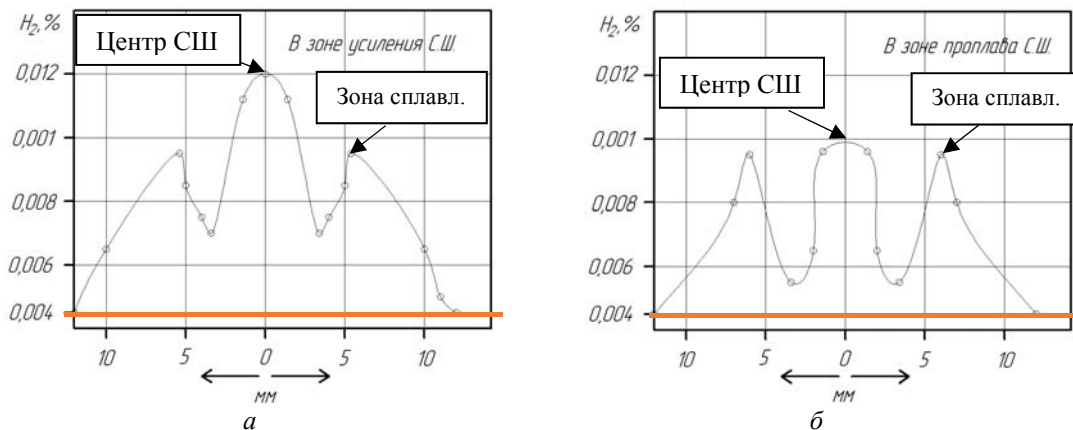


Рис. 1. Распределение содержания водорода по сварному шву сплава BT23, выполненного на установке 30E3000 с толщиной 50 мм: а – зона усиления; б – корневая зона; — — — исходное состояние

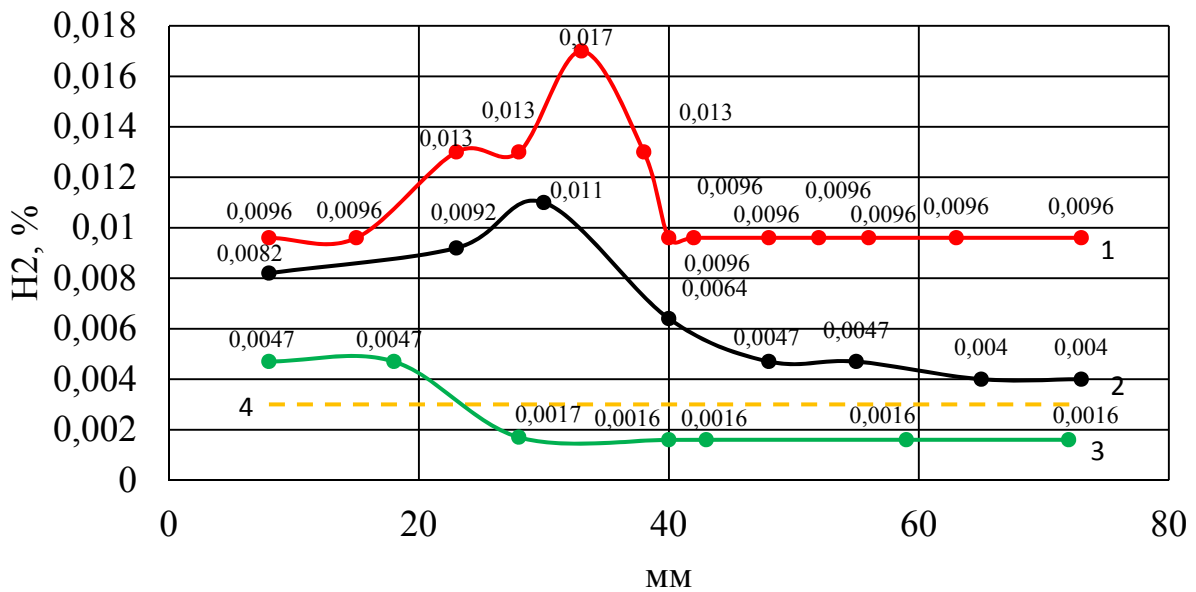


Рис. 2. Распределение водорода вдоль сварного шва из сплава ВТ23 по зонам:
 1 – по линии сплавления; 2 – по центру СШ;
 3 – по промежутку между линиями сплавления и центром СШ; 4 – исходное состояние

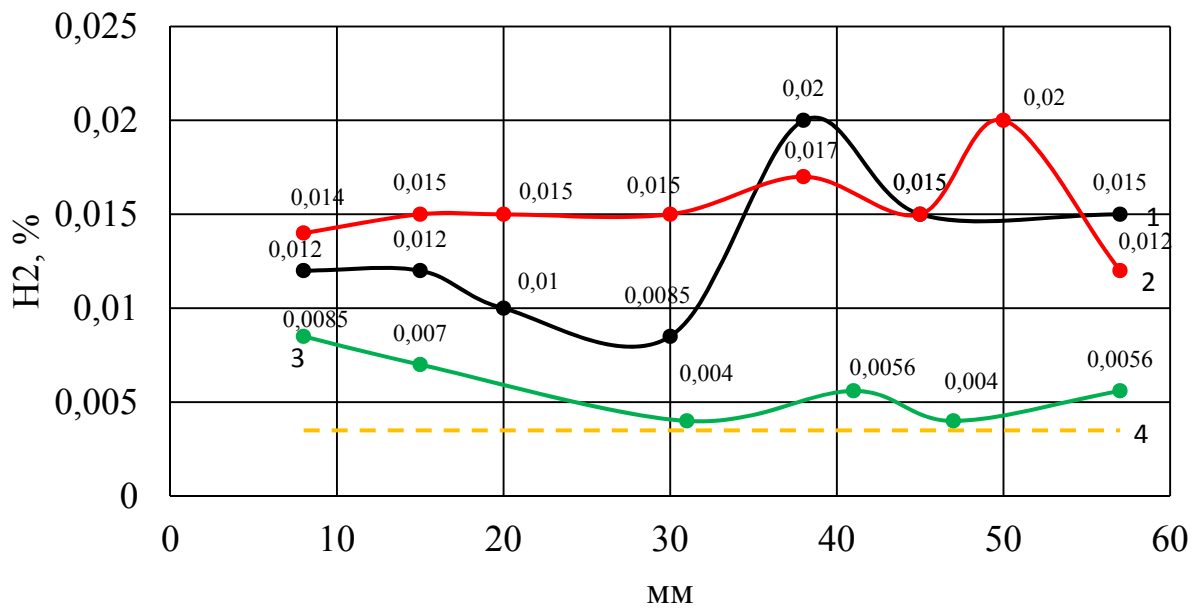


Рис. 3. Распределение водорода вдоль сварного шва из сплава ВТ20 по зонам:
 1 – по линии сплавления; 2 – по центру СШ;
 3 – по промежутку между линиями сплавления и центром СШ ближе к линии сплавления;
 4 – исходное состояние

Распределение водорода вдоль сварного шва сплавов ВТ20 и ВТ23 находится в полной зависимости от преимущественного порообразования при ЭЛС: максимумы по линии сплавления и центру СШ, минимумы (близкие по содержанию водорода в основном металле) по промежутку между центром СШ и линией сплавления (рис. 2, 3).

Неравномерность распределения водорода по зонам определяется температурой соединяемых в процессе ЭЛС кромок.

Для сплава ВТ23 при двухсторонней ЭЛС более равномерное распределение водорода в сварном шве наблюдается на втором участке сварного шва (рис. 2), что можно объяснить влиянием первого прохода сварки на качество поверхности заготовок.

Наиболее подробно распределение водорода, впервые обнаруженное на ММЗ «Опыт» им. А.Н. Туполева, приведено в работе [15]. При этом закономерности распределения водорода следуют из периодического переноса насыщенного водорода в металле передней расплавленной зоны в зону, расположенную сзади луча. Это приводит к периодическому распределению водорода вдоль шва. В этом принимают участие как вещества, адсорбированные на поверхности свариваемых кромок, так и растворённый в основном металле водород.

Как известно [16], титановые сплавы длительное время не находили широкого применения в авиастроении из-за значительного содержания газовых примесей, особенно водорода, что приводило к преждевременному хрупкому разрушению. Это продолжалось до тех пор, пока металлурги не научились получать титановые сплавы с регламентированным содержанием газовых примесей (водорода 0,015%; кислорода 0,15%; азота 0,05%).

В проведённых исследованиях исходное содержание водорода составило в сплавах: ВТ20 ($h = 60$ мм) – 0,0035%; ВТ23 ($h = 75$ мм) – 0,003; ВТ23 ($h = 50$ мм) – 0,004%. Поэтому водород, растворённый в указанных количествах, практически не может оказывать влияние на образование пор и концентрированное распределение водорода в ШШ. Этого нельзя сказать о веществах, не просто адсорбированных, а капиллярно-конденсированных на поверхности стыкуемых кромок [6; 10; 12].

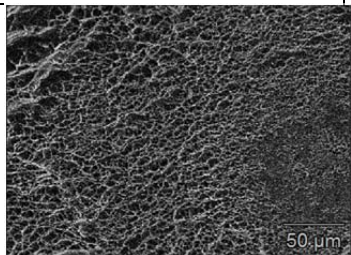
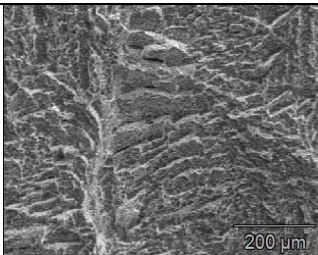
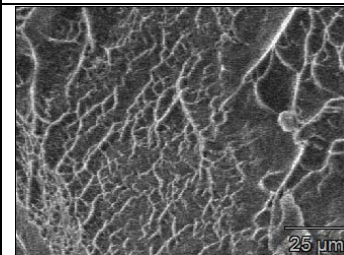
Поля напряжений в шве оказывают существенное влияние на распределение водорода, поскольку ЭЛС в значительной степени отличается от АрДЭС, образуя узкий и глубокий шов в виде клина с довольно узкой зоной термического влияния и с формированием значительных внутренних напряжений.

Как известно [17 - 19], плавление электронным лучом происходит по передней стенке углубления кратера (зона соединяемых кромок) – расплавленный металл сдвигается по боковым стенкам к задней, где он кристаллизуется. При этом ЭЛС приводит к интенсивному образованию парогазовой плазмы за счёт интенсивного испарения материала. Давление отдачи паров, покидающих зону плавления, прогибает поверхность сварочной ванны и в расплаве формируется глубокий и узкий канал проплавления, жидкие стенки которого удерживаются давлением паров [20; 21].

Температурные условия разогрева свариваемых кромок будут зависеть от мощности установки ЭЛС, скорости сварки, толщины свариваемых заготовок. По мере удаления от шва максимальные температуры нагрева t_{\max} снижаются. После достижения t_{\max} в любой точке зоны термического влияния происходит охлаждение в основном за счёт теплоотвода в более холодный металл. Скорость нагрева w_n и скорость охлаждения w_0 каждого участка ЗТВ зависит от величины t_{\max} . Таким образом, для ЗТВ характерны неравномерность нагрева и связанные с нею напряжённое состояние, деформации, фазовые и структурные изменения.

Таким образом, величина t_{\max} будет влиять в широких пределах на плавление в зоне сплавления расплава со стенками металла кратера: от возможного выплеска расплава на стенку и образования пустоты (несплавления) либо частичного плавления границ зёрен из-за разницы диффузионных процессов в объёме зерна и на границе сплавления. Об этом свидетельствует химический состав зоны сплавления (табл. 2), а также результаты исследований [22].

Таблица 2. Химический состав линий сплавления сварного соединения сплава ВТ23 с толщиной 50 мм

Легирующий элемент	№ 1	№ 2	№ 3
			
Al	5,29	4,81	5,93
N	0,00	0,00	0,00
O	9,25	0,00	0,00
Ti	75,09	85,74	84,83
Si	0,00	0,00	0,00
V	3,33	5,21	1,62
Cr	0,00	0,98	2,98
Fe	2,25	1,07	0,90
Zr	1,25	0,16	1,60
Mo	3,54	2,03	2,14

Максимальная температура нагрева стенок, достаточная для плавления по объёму зёрен при взаимодействии с расплавом под давлением парогазовой плазмы, а также низкое качество поверхности стыкуемых кромок (значительная насыщенность капиллярно-конденсированными загрязнениями) приведёт к попаданию готовых зародышей пор (ККВ загрязнений) и увеличенному содержанию водорода (из продуктов десорбции загрязнений) в сварном шве. Об этом свидетельствуют процессы хрупкого разрушения, линии скольжения и двойникования на внутренней поверхности поры после механического воздействия (растяжение, удар) (рис. 4) и химический состав на поверхности пор (табл. 3).

О сложности процесса формирования сварного шва и распределения водорода в нём свидетельствует изменение химического состава в сечении кратера, в усилении и в корне сварного шва в момент окончания сварки, в местах сплавления, порах и на поверхности (табл. 4, 5).

Существенное изменение химического состава наблюдается в тупиковой зоне проплавления (корневые дефекты в виде пикообразований) в технологической подложке (табл. 6).

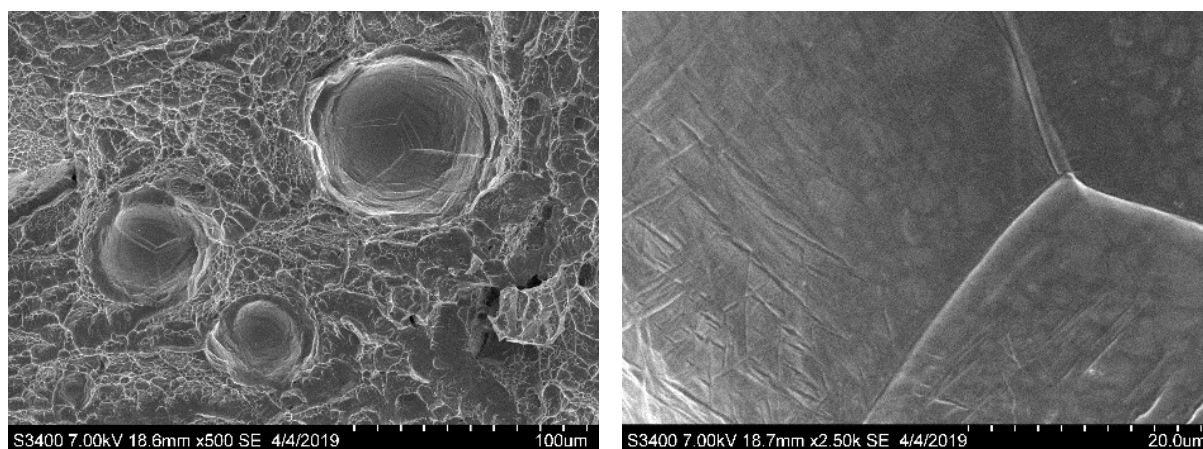


Рис. 4. Линии скольжения и двойникования на поверхности поры

Таблица 3. Химический состав пор в сварном шве ВГ23 с толщиной 50 мм

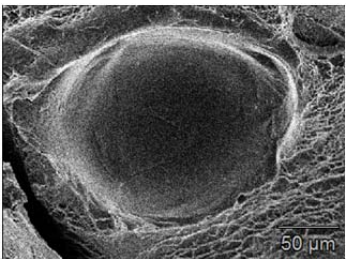
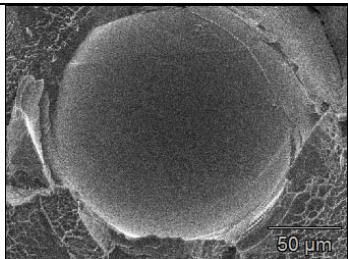
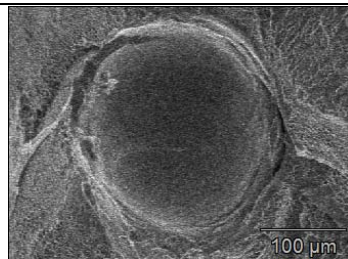
Легирующий элемент	№ 1	№ 2	№ 3
			
Al	7,53	4,23	6,15
N	0,00	2,47	0,00
O	0,00	0,00	0,00
Ti	76,97	82,40	84,63
Si	0,43	0,00	0,00
V	5,24	7,43	7,57
Cr	1,59	0,54	1,27
Fe	0,59	1,08	0,69
Zr	3,01	0,12	0,18
Mo	4,62	1,72	3,39

Таблица 4. Изменение химического состава на поверхности излома кратера сварного соединения на исходе электронного луча (в усилении)

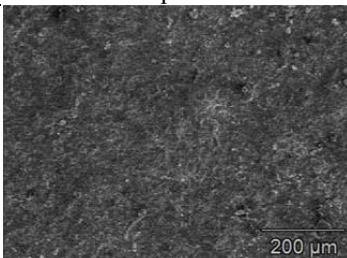
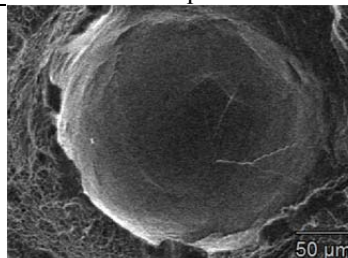
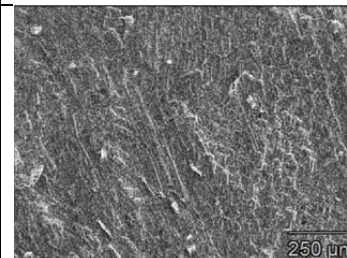
Легирующий элемент	Поверхность	Пора	Линия сплавления
			
Al	4,26	4,03	7,84
N	0,00	3,32	0,00
C	1,73	2,58	0,00
O	21,71	0,00	38,54
Ti	49,96	83,83	47,42
Si	0,31	0,31	0,10
V	7,93	3,22	3,67
Cr	1,63	0,61	0,64
Fe	7,75	0,09	0,57
Zr	0,00	0,00	0,71
Mo	3,69	2,00	0,87

Таблица 5. Изменение химического состава на поверхности излома кратера сварного соединения на исходе электронного луча (в корне)

Легированный элемент	Содержание в процентах		
	Поверхность	Пора	Линия сплавления
Al	5,35	4,68	5,25
N	0,00	0,00	0,00
C	0,00	2,75	1,87
O	24,79	0,00	0,00
Ti	55,55	81,57	85,21
Si	0,00	0,04	0,26
V	0,00	7,21	5,38
Cr	3,89	0,00	0,71
Fe	0,00	2,00	0,00
Zr	2,93	0,00	0,00
Mo	7,50	1,75	1,30

Таблица 6. Изменение химического состава на поверхности излома технологической подложки в корне шва

Легированный элемент	Содержание в процентах			
	Выплеск		Линия сплавления	Сварное соединение
	на кромке	в центре		
Al	6,40	6,21	4,44	5,86
Ti	84,84	82,50	86,68	83,80
Si	0,39	0,00	0,30	0,28
V	5,54	5,84	5,58	3,80
Cr	1,51	1,33	0,71	4,36
Fe	0,00	1,37	0,93	1,37
Zr	0,00	0,00	0,00	0,39
Mo	1,32	2,76	1,36	2,17
N	0,00	0,00	0,00	0,00
C	0,00	0,00	0,00	0,00
O	0,00	0,00	0,00	0,00

Заключение

Исследования распределения водорода в сварных швах, выполненных ЭЛС, выявили существенное отличие от распределения водорода в сварных соединениях титановых сплавов, выполняемых АрДЭС. Если при АрДЭС в сечении сварного шва наблюдаются пики с повышенным содержанием водорода в зонах сплавления и отсутствием их в центре сварного шва, то при ЭЛС чётко наблюдаются пики повышенного содержания водорода в сечении сварного шва как в зоне сплавления, так и в центре сварного шва.

Температурные условия разогрева свариваемых кромок в зависимости от мощности установки ЭЛС, скорости сварки, толщины свариваемых заготовок приводят к появлению существенных изменений содержания водорода от вида образования дефектов: недостаточная температура разогрева кромок вызывает выплеск металла и несплавление; расплавление по границам зёрен и переход расплава в сварочную ванну связаны с образованием субмикropористости; плавление кромок по объёму зёрен приводит к образованию пористости за счёт попадания готовых зародышей пор (замкнутых областей, заполненных капиллярно-конденсированной влагой).

Библиографический список

1. Кузнецов А.А., Муравьев В.И., Дёмышев П.Г. Особенности формирования металла шва при электронно-лучевой сварке (ЭЛС) конструкций из титановых сплавов // Труды IV Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения» (26-28 ноября 2008 г., Томск). Томск: Томский политехнический университет, 2008. С. 403-408.
2. Братухин А.Г., Иванов Ю.Л., Марьин Б.Н., Меркулов В.И. Штамповка, сварка, пайка и термообработка титана и его сплавов в авиастроении. М.: Машиностроение, 1997. 600 с.
3. Александров В.К., Аношкин Н.Ф., Бочвар Г.А., Брун М.Я., Ерманок М.З. Полуфабрикаты из титановых сплавов. М.: Metallurgy, 1979. 512 с.
4. Лопатко А.П., Карташов Л.Г., Ткачев Л.Г. Определение глубины проплавления при ЭЛС металлов больших толщин // Тезисы докладов V Всесоюзной конференции по электронно-лучевой сварке. Киев: Наукова думка, 1975. С. 16-19.
5. Электронно-лучевая сварка / под ред. Б.Е. Патона. Киев: Наукова думка. 1987. 256 с.
6. Муравьев В.И. Проблемы порообразования в сварных швах титановых сплавов // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. 2005. № 7 (601). С. 30-37.
7. Замков В.Н., Шевелев А.Д. Образование пор в сварных соединениях титанового сплава ВТ6, выполненных электронно-лучевой сваркой // Автоматическая сварка. 1979. № 12. С. 50-54.
8. Моисеев В.Н., Куликов Ф.Р., Кириллов Ю.Г., Шохолова Л.В., Васькин Ю.В. Сварные соединения титановых сплавов. М.: Metallurgy, 1979. 248 с.
9. Гуревич С.М. Справочник по сварке цветных металлов. Киев: Наукова думка, 1990. 512 с.
10. Редчиц В.В., Фролов В.А., Казаков В.А., Лукин В.И. Пористость при сварке цветных металлов. М.: Технология машиностроения, 2002. 448 с.
11. Сейдгазов Р.Д. Экспресс-проектирование технологии лучевой сварки с минимизацией порообразования // Сборник материалов и докладов Международной конференции электронно-лучевой сварки и смежных технологий (17-20 ноября 2015 г., Москва). М.: Издательство МЭИ, 2015. С. 554-565.

12. Муравьев В.И., Бахматов П.В., Лончаков С.З., Григорьев В.В. Определение содержания водорода в титановых сплавах в ходе технологического цикла // Сварочное производство. 2018. № 3. С. 14-20.

13. Конструкционные материалы. Справочник / под ред. Б.Н. Арзамасова. М.: Машиностроение, 1990. 688 с.

14. Чертов И.М., Карпенко А.С., Островой А.П. Влияние режимов термической обработки на остаточные напряжения в сварных соединениях технического титана // Автоматическая сварка. 1981. № 8. С. 68-69.

15. Братухин А.Г., Колачев Б.А., Садков В.В., Талалаев В.Д., Веселов А.А. Технология производства титановых самолётных конструкций. М.: Машиностроение, 1995. 443 с.

16. Братухин А.Г., Иванов Ю.Л., Марьин Б.Н. Современные технологии авиастроения. М.: Машиностроение, 1999. 832 с.

17. Фролов В.А., Петренко В.Р., Пешков В.В., Коломенский А.Б., Казаков В.А. Технология сварки плавлением и термической резки металлов: учеб. пособие. М.: Альфа М: ИНФРА-М, 2011. 448 с.

18. Назаренко О.К., Истомина Е.И., Локшин В.Е. Электронно-лучевая сварка. Харьков: Машиностроение, 1985. 127 с.

19. Трушников Д.Н., Саломатова Е.С., Беленький В.Я., Колева Е.Г., Младенов Г.М. О температуре в канале проплавления при электронно-лучевой сварке // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15, № 6-2. С. 505-511.

20. Kaplan A.F.H., Norman P., Eriksson I. Analysis of the keyhole and weld pool dynamics by imaging evaluation and photodiode monitoring // Proceedings of LAMP 2009 - The 5th International Congress on Laser Advanced Materials Processing. 2009. P. 1-6.

21. Won-Ik Cho, Suck-Joo Na, Thomy C., Vollertsen F. Numerical simulation of molten pool dynamics in high power disk laser welding // Journal of Materials Processing Technology. 2012. V. 212, Iss. 1. P. 262-275. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.09.011

22. Курган К.А., Клименов В.А., Чумаевский А.В., Клопотов А.А. Структура сварных соединений наноструктурированного титанового сплава ВТ6, полученных при электронно-лучевой сварке // Сборник трудов Международной конференции с элементами научной школы для молодёжи «Материалы и технологии новых поколений в современном материаловедении» (9-11 ноября 2015 г., Томск). Томск: Томский политехнический университет, 2015. С. 111-115.

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF ELECTRON BEAM WELDING OF TITANIUM ALLOYS ON HYDROGEN DISTRIBUTION IN THE WELD

© 2019

V. I. Muravyev Doctor of Science (Engineering), Consulting Professor, Department of Mechanical Engineering and Metallurgy;
Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation;
vmuravyev@mail.ru

P. V. Bakhmatov Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering and Metallurgy;
Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation;
mim@knastu.ru

V. V. Grigorev Leading Engineer, Department of Mechanical Engineering and Metallurgy;
Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation;
grigorev.vlv@gmail.com

- O. G. Shakirova** Doctor of Science (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Oil and Polymer Processing Technology; Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation; tpnp@knasu.ru
- S. A. Iskhakov** Head of the Spectral Laboratory; Branch of Public Joint Stock Company "Aviation Holding Company "Sukhoi" Komsomolsk-on-Amur Aircraft Plant named after Y.A. Gagarin, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation; mim@knastu.ru

The paper presents the results of analyzing distribution of hydrogen in welded joints obtained by electron beam welding of titanium alloys VT20 and VT23. The distribution of hydrogen in the cross section of welded joints was measured in the area of the weld, in the heat-affected zone and in the base metal by means of spectral analysis using low-voltage pulse discharge on the spectrograph ISP-51. It was established that hydrogen peaks in fixed joints obtained by electron beam welding, unlike argon arc welding, are located not only in the heat-affected area, but also in the central part of the welded joint. Chemical analysis of fractures of fixed joints investigated with the aid of a scanning electron microscope Hitachi S-3400N showed that the pores in the welded joints made by electron beam welding occur due to the desorption of capillary-condensed contaminants located in the defects of the edge surface into the melt and due to selective grain boundary fusion because of insufficient temperature conditions of whole grain melting. It was found that emerging variations in hydrogen content, with formation of defects, are influenced by the temperature conditions of heating of the welded edges, the welding rate and the thickness of welded blanks.

Titanium alloys; electron beam welding; hydrogen in welded joints; porosity; capillary-condensed moisture; welded joint fracture patterns; surface defects of butting edges.

Citation: Muravyev V.I., Bakhmatov P.V., Grigorev V.V., Shakirova O.G., Iskhakov S.A. Research of the influence of electron beam welding of titanium alloys on hydrogen distribution in the weld. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019. V. 18, no. 4. P. 157-168. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-4-157-168

References

1. Kuznetsov A.A., Murav'ev V.I., Demyshev P.G. Osobennosti formirovaniya metalla shva pri elektronno-luchevoy svarke (ELS) konstruktsiy iz titanovykh splavov. *Trudy IV Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Sovremennye problemy mashinostroeniya» (November, 26-28, 2008, Tomsk)*. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publ., 2008. P. 403-408. (In Russ.)
2. Bratukhin A.G., Ivanov Yu.L., Mar'in B.N., Merkulov V.I. *Shtampovka, svarka, payka i termoobrabotka titana i ego splavov v aviastroenii* [Forging, welding, brazing and heat treatment of titanium and its alloys in aircraft construction]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1997. 600 p.
3. Aleksandrov V.K., Anoshkin N.F., Bochvar G.A., Brun M.Ya., Ermanok M.Z. *Polufabrikaty iz titanovykh splavov* [Semi-finished products of titanium alloys]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1979. 512 p.
4. Lopatko A.P., Kartashov L.G., Tkachev L.G. Opredelenie glubiny proplavleniya pri ELS metallov bol'shikh tolshchin. *Tezisy dokladov V Vsesoyuznoy konferentsiy po elektronoluchevoy svarke*. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1975. P. 16-19. (In Russ.)
5. *Elektronno-luchevaya svarka / pod red. B.E. Patona* [Electron beam welding]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1987. 256 p.
6. Murav'ev V.I. Problems of pore formation in welded joints of titanium alloys. *Metal Science and Heat Treatment*. 2005. V. 47, Iss. 7-8. P. 282-288. DOI: 10.1007/s11041-005-0068-5

7. Zamkov V.N., Shevelev A.D. Pore formation in welded joints of BT6 titanium alloy produced by electron beam welding. *Avtomaticheskaya Svarka*. 1979. No. 12. P. 50-54. (In Russ.)
8. Moiseev V.N., Kulikov F.R., Kirillov Yu.G., Shokholova L.V., Vas'kin Yu.V. *Svarnye soedineniya titanovykh splavov* [Titanium alloy welded joints]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1979. 248 p.
9. Gurevich S.M. *Spravochnik po svarke tsvetnykh metallov* [Handbook on welding of non-ferrous metals]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1990. 512 p.
10. Redchits V.V., Frolov V.A., Kazakov V.A., Lukin V.I. *Poristost' pri svarke tsvetnykh metallov* [Porosity formed in welding of non-ferrous metals]. Moscow: Tekhnologiya Mashinostroeniya Publ., 2002. 448 p.
11. Seydgazov R.D. Ekspress-proektirovanie tekhnologii luchevoiy svarki s minimizatsiey poroobrazovaniya. *Sbornik materialov i dokladov Mezhdunarodnoy konferentsii elektronno-luchevoiy svarki i smezhnykh tekhnologiy (November, 17-20, 2015, Moscow)*. Moscow: Moscow Power Engineering Institute Publ., 2015. P. 554-565. (In Russ.)
12. Muravev V.I., Bakhmatov P.V., Lonchakov S.Z., Grigorev V.V. Determination of hydrogen content in titanium alloys during the technological cycle. *Svarochnoe Proizvodstvo*. 2018. No. 3. P. 14-20. (In Russ.)
13. *Konstruksionnye materialy. Spravochnik / pod red. B.N. Arzamasova* [Structural materials]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1990. 688 p.
14. Chertov I.M., Karpenko A.S., Ostrovoy A.P. Impact of heat treatment conditions on residual stresses in commercial titanium welded joints. *Avtomaticheskaya Svarka*. 1981. No. 8. P. 68-69. (In Russ.)
15. Bratukhin A.G., Kolachev B.A., Sadkov V.V., Talalaev V.D., Veselov A.A. *Tekhnologiya proizvodstva titanovykh samoletnykh konstruksiy* [Process of manufacturing of titanium aircraft structures]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1995. 443 p.
16. Bratukhin A.G., Ivanov Yu.L., Mar'in B.N. *Sovremennye tekhnologii aviastroeniya* [Modern technologies of aircraft manufacturing]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1999. 832 p.
17. Frolov V.A., Petrenko V.R., Peshkov V.V., Kolomenskiy A.B., Kazakov V.A. *Tekhnologiya svarki plavleniem i termicheskoy rezki metallov: ucheb. posobie* [Process of fusion welding and thermal cutting of metals]. Moscow: Al'fa-M: INFRA-M Publ., 2011. 448 p.
18. Nazarenko O.K., Istomin E.I., Lokshin V.E. *Elektronno-luchevaya svarka* [Electron beam welding]. Kharkov: Mashinostroenie Publ., 1985. 127 p.
19. Trushnikov D.N., Salomatova E.S., Belenkiy V.Ya., Koleva E.G., Mladenov G.M. About the temperature in foundering channel at electron beam welding. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN*. 2013. V. 15, no. 6-2. P. 505-511. (In Russ.)
20. Kaplan A.F.H., Norman P., Eriksson I. Analysis of the keyhole and weld pool dynamics by imaging evaluation and photodiode monitoring. *Proceedings of LAMP 2009 - The 5th International Congress on Laser Advanced Materials Processing*. 2009. P. 1-6.
21. Won-Ik Cho, Suck-Joo Na, Thomy C., Vollertsen F. Numerical simulation of molten pool dynamics in high power disk laser welding. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012. V. 212, Iss. 1. P. 262-275. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.09.011
22. Kurgan K.A., Klimenov V.A., Chumaevskii A.V., Klopotov A.A. Structure of welded joints of nanostructured titanium alloy vt6 obtained by electron beam welding. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoy konferentsii s elementami nauchnoy shkoly dlya molodezhi «Materialy i tekhnologii novykh pokoleniy v sovremennom materialovedenii» (November, 9-11, 2015, Tomsk)*. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publ., 2015. P. 111-115. (In Russ.)