

ОБЕСПЕЧЕНИЕ СВОЙСТВ СОЕДИНЕНИЙ ТИТАНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ПЛАВЛЕНИЕМ, ОДИНАКОВЫХ СО СВОЙСТВАМИ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА

Муравьев В.И.*, Бахматов П.В.**, Григорьев В.В.***

*Комсомольский-на-Амуре государственный университет (КНАГУ),
ул. Ленина, 27, Комсомольск-на-Амуре, 681013, Россия*

**e-mail: vmuravyev@mail.ru*

***e-mail: mim@knastu.ru*

****e-mail: grigorev.vlv@gmail.com*

Статья поступила в редакцию 21.06.2021

Приведена оценка влияния технологических приемов исключения пор в металле шва на свойства неразъемных соединений при сборке титановых конструкций летательных аппаратов. Исследования проводились на титановых сплавах ВТ20, ВТ23 с использованием сварочных установок, применяемых в серийном производстве летательных аппаратов (УСП-5000, АДСВ-6, ГСПД-1, КЛ-144). Рассмотрено влияние различных способов сварки (электронно-лучевой, автоматической аргонодуговой, погруженным вольфрамовым электродом) на механические свойства и геометрические параметры неразъемных соединений. Установлено, что увеличение времени существования сварочной ванны способствует исключению пористости в неразъемных соединениях, но приводит к изменению геометрических параметров сварных швов и снижению прочности. Выявлено, что для улучшения качества неразъемных соединений необходимо повышение жидкотекучести сварочной ванны и уменьшение вязкости. По результатам исследования интенсификации перемешивания жидкометаллической ванны при сварке вольфрамовым погруженным электродом (СПВЭ) и электронно-лучевой сварке (ЭЛС) установлено, что наиболее перспективным способом обеспечения качества неразъемных соединений (исключение пористости, получение свойств, близких к свойствам основного металла) является применение осциллирующей электронного луча при электронно-лучевой сварке или применение колебательных движений электрода при автоматической аргонодуговой сварке.

Ключевые слова: титановые сплавы, неразъемные соединения, узловая сборка, электронно-лучевая сварка, автоматическая аргонодуговая сварка, силовые элементы летательных аппаратов.

Введение

Развитие и усовершенствование современных летательных аппаратов, способных выдерживать колоссальные перегрузки и обладающих большим эксплуатационным ресурсом, требует разработки и внедрения новейших материалов.

В настоящее время и на ближайшее будущее одним из самых востребованных материалов, удовлетворяющих постоянно возрастающим требованиям к летным характеристикам перспективных летательных аппаратов (ЛА), будут титановые сплавы (ТС) [1]. Благодаря их уникальным свойствам (высокая удельная прочность, коррозионная стойкость, жаропрочность, удовлетворительная свариваемость и др.) создаются наибо-

лее эффективные и экономически выгодные условия для сборки из отдельных элементов конструкций (таких, как панель центроплана, панели хвостовой части фюзеляжа, различных видов шпангоуты, лонжероны и др.) созданием неразъемных соединений (НС) методами сварки плавлением с использованием различных высококонцентрированных источников плавления: электродуговых, электронно-лучевых, лазерных и др. [2–4].

Значительные сложности связаны с проблемой порообразования в металле шва НС при сборке титановых конструкций сваркой плавлением.

В результате многочисленных исследований достигнуты определенные успехи. Научно обоснована [5] и постоянно подтверждается другими исследователями [6] теория образования пор за счет попадания готовых зародышей в расплав сварочной ванны.

Интенсификация процесса перемешивания сварочной ванны в процессе образования НС с использованием тороидального плавящегося электрода при сборке автоматической аргонодуговой сваркой (ААрДЭС) или сваркой вольфрамовым погруженным электродом (СПВЭ) конструкций больших толщин [7] позволяет полностью исключить не только порообразование, но и газонасыщение на кромках при раскрое заготовок газокислородной резкой. Но существующее оборудование не позволяет производить сборку конструкций больших толщин.

Увеличение времени существования сварочной ванны благодаря рациональному выбору режимов сварки, а также применению флюсов при создании НС не всегда обеспечивает требуемые свойства [5, 8]. Использование рифления кромок соединяемых элементов [9, 10] при образовании НС сваркой плавлением уменьшает количество пор в металле шва, но не исключает их полностью, при этом значительно увеличивается трудоемкость изготовления конструкции.

Применение газолазерного раскроя (ГЛР) элементов для получения НС при сборке конструкций сваркой плавлением практически полностью исключает порообразование в металле шва, но требует дополнительной термообработки кромок после ГЛР [11, 12].

Заслуживают внимания работы образования НС W-образным электродом [10] или осциллирующей электронного луча [13] при сборке конструкций сваркой плавлением, при этом пористость не исключается полностью, но появляется возможность управлять процессом сварки для получения удовлетворительных свойств НС.

Таким образом, достигнутые результаты исследований позволяют уменьшить пористость в металле шва, что достигается в большинстве случаев за счет снижения на 8–10 % прочностных характеристик НС по сравнению с основным металлом конструкции [14].

В работе [15] указывается, что структура и свойства сварных соединений титановых сплавов определяются процессами термического цикла сварки (ТЦС). Отсюда критерием выбора режимов и технологии ТЦС является оптимальный интервал как скорости сварки, так и охлаждения

при сварке. При этом при средних или относительно высоких скоростях охлаждения, соответствующих режимам аргонодуговой сварки металлов средней или малой толщины, получаются наиболее высокие характеристики НС, а именно пластичности при удовлетворительной прочности, т.е. при жестких режимах сварки. При мягких режимах сварки свойства НС ухудшаются. Известно также, что малоизученным является процесс порообразования при электронно-лучевой сварке.

Цель исследования — выявить влияние технологических приемов исключения пор в металле шва на свойства неразъемных соединений при сборке титановых конструкций летательных аппаратов.

Методика проведения исследований

Для проведения исследований использовали сварочное оборудование и материалы для изготовления титановых конструкций сборкой из элементов неразъемными соединениями, выполняемыми сваркой плавлением в серийном производстве.

Режимы образования НС и материалы заготовок приведены в табл. 1, а химический состав образцов заготовок — в табл. 2.

Геометрические размеры получаемых неразъемных соединений измеряли штангенциркулем с точностью до 0,01 мм.

Радиографический контроль производили с использованием радиографического комплекса ЭКСТРАВОЛЬТ-225 и РАП 150/300. Химический состав определялся с использованием оптико-эмиссионного спектроанализатора Q4 TASMANN 170 Bruker. Содержание водорода оценивалось с использованием искрового спектрального комплекса ИСП-51. Содержание кислорода и азота оценивалось на растровом сканирующем микроскопе Hitachi S3400N. Механические свойства на статическое растяжение и загиб исследовались на испытательной машине Instron 3382.

Результаты исследований и их обсуждение

В основе методов улучшения качества НС, выполненных сваркой плавлением, — исключение пористости в металле шва. Как было показано в работе [5], определяющее влияние на кинетику удаления пузырьков (пор) из жидкометаллической ванны оказывает гравитационное поле. Таким образом, удаление пор зависит от времени существования сварочной ванны.

Таблица 1

Виды оборудования и режимы сварки образцов заготовок, использованных при исследованиях

Оборудование	№ п.п.	Размер заготовки, мм	Режимы сварки АрДЭС				Расход аргона, л/мин			
			$I_{св}$, А	U_d , В	$V_{св}$, мм/с	$V_{пр}$, мм/с	Горелка	Козырек	Поддув	
ААрДЭС на стапеле автоматом АДСВ-6, источник питания ВСВУ-315	1	100x2x500	115-140	9-10	4,17-5,56		7-9		3-5	
	2	100x3x500	240-260	9-10	2,08-2,33		8-10		3-5	
	3				4,17-5,56			7		
	4	100x2x500	90-100	10	4,16		9		4,5	
	5				5,56					
	6				6,94					
	Режим сварки W-образным электродом при $t = 2,23$									
		7	100x2,5x200	200	10	2,5		9		4,5
	8	100x2,5x200	200	10	4,16		9		4,5	
УСП-5000	9	200x3x700	280	16,5	2,2		7	6	5	
	10		280	16,5	2,5					
Режимы сварки СПВЭ										
ГСПД-1	11	300x40x60	364		12		1,5		24	
	12		377		15		1,5		40	
Режимы ЭЛС										
КЛ-144			I_w , МА		I_f , МА		F , мм		$V_{св}$, мм/с	
	13	220x30x40	330		600		200		16	
	14	220x30x40	380		600		200		16	
<p>Примечание: № 1-13 – сплав ВТ20; №14 – сплав ВТ23;</p> <p>для № 1-5, 8, 9, 10 - $I_{св}$ – ток сварки; U_d – напряжение на дуге; $V_{св}$ – скорость сварки;</p> <p>для № 11, 12 - $I_{св} a+b h_{гд} = 350A + 1,51 \cdot 9 = 364$; соответственно $350 + 1,51 \cdot 18 = 377$;</p> <p>для № 13, 14 - $I_{св}$ – ток сварки; I_f – ток фокусировки; F – расстояние от торца пушки до детали; $V_{св}$ – скорость сварки.</p>										

Таблица 2

Химический состав материала образцов заготовок для проведения исследований по режимам, указанным в табл. 1, из сплавов ВТ20 и ВТ23

Режим НС по таблице №1	Толщина заготовки h , мм	Химический состав, %				
		Al	Mo	V	Zr	H ₂
1	2	5,6	0,80	1,06	1,67	0,007
2	3	6,04	0,84	1,17	2,78	0,004
3						
4	2	5,96	0,58	1,16	1,73	0,007
5						
6						
7	2,5	6,14	0,74	1,14	1,50	0,007
8						
9	3	6,17	0,72	1,06	1,83	0,007
10						
11	40	6,5	1,6	2,2	1,8	0,006
12						
13	30	6,9	1,9	2,4	2,2	0,006
14	40	5,29	3,54	3,33	1,25	0,007
По ОСТ 190013-81		5,5 – 7,0	0,5 – 2,0	0,8 – 2,5	1,5 – 2,5	< 0,0015

Исходя из этого выбор параметров режимов сварки должен обеспечивать оптимальное время существования жидкометаллической ванны, необходимое для всплытия и удаления из нее газовых пузырьков.

Режимы сварки. Как видно из данных табл. 3 и рис. 1, увеличение времени существования сварочной ванны в зависимости от режимов сварки ААРДЭС сплава ВТ20 оказывает сложное влияние на качество НС. Во-первых, изменяются геометрические параметры металла шва НС

(рис. 1). При одном и том же сварочном токе и напряжении на дуге (4, 5, табл. 1), но меньшей скорости сварки (4, табл. 1) увеличиваются значительно все размеры: и общая ширина (L), и величины усиления (h_1) и проплава (h_2). Еще большее влияние оказывает увеличение сварочного тока (6, табл. 1), даже при повышенной скорости сварки.

Во-вторых, наблюдается существенное изменение механических свойств, особенно снижение временного сопротивления разрыву практически от 1 до 15% по сравнению с временным сопротивлением разрыву основного металла (табл. 4).

Разупрочнение металла неразъемного соединения псевдо- α -титановых сплавов целиком определяется процессами термического цикла сварки [4], поскольку сварка плавлением сопровождается образованием химической и физической неоднородности зоны соединения из-за разницы в скорости диффузионных процессов и в скорости процессов теплоотвода жидкометаллической ванны и закристаллизовавшегося металла.

Как показали эксперименты (рис. 1, табл. 4, режимы сварки № 2, 4, 5, 7, 9, 10), увеличение

Таблица 3

Изменение геометрических размеров НС в зависимости от режимов сварки

Режим сварки по табл. 1	Размеры, мм		
	СШ + ЗТВ, L , мм	Усиление	Корень
	L , мм	h_1 , мм	h_2 , мм
4	16	0,81	0,08
5	18	0,03	0,08
6	22	0,41	0,12

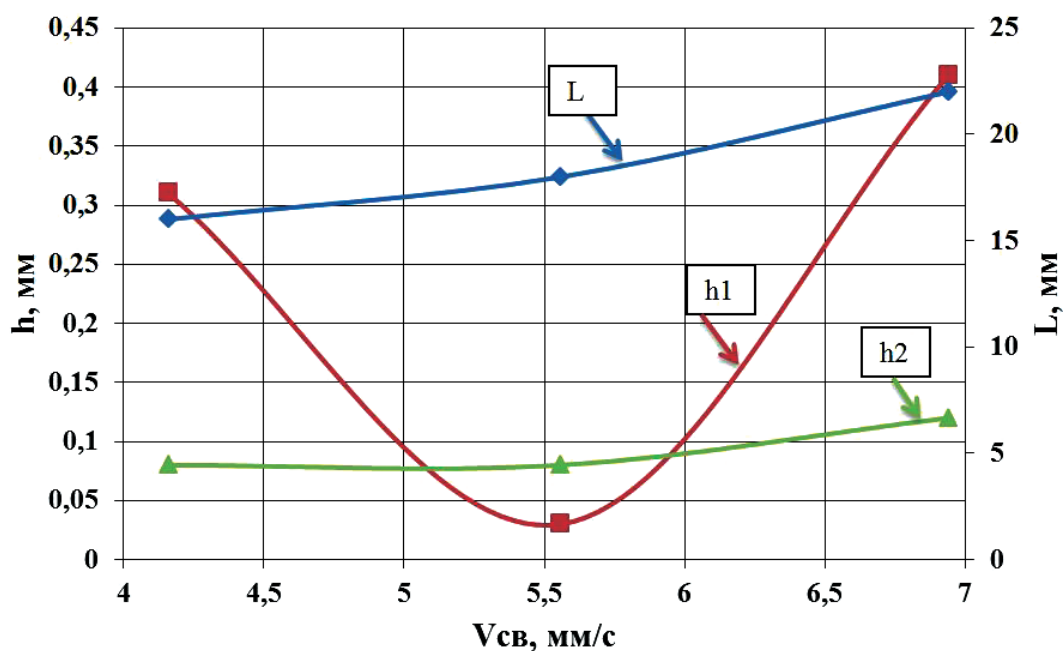


Рис. 1. Изменение размеров НС из сплава ВТ20 в зависимости от режимов ААрДЭС (4, 5, 6 в табл. 1): L – ширина СШ + ЗТВ, мм; h_1 – высота усиления, мм; h_2 – высота проплава, мм

Таблица 4

Изменение механических свойств НС в зависимости от режимов сварки в процессе сборки из титанового сплава ВТ20 конструкций и их сравнение со свойствами основного металла

№ режима сварки по табл. 1	Механические свойства				
	Основной металл			Неразъемное соединение	
	$\sigma_{во}$, МПа	δ , %	f^0	$\sigma_{вс}$, МПа	f^0
ААрДЭС					
1	1024	16	50	1040	48
2	1025	18,5	46	870	41
3	1025	18,5	46	1040	41
4	1009	17,7	58	990	45
5	1009	17,7	58	1005	36
6	1009	17,7	58	1035	30
7	991	15,2	53	887	54
8	991	15,2	53	983	42
9	1007	16,2	67	960	48
10	1007	16,2	67	983	37
СПВЭ					
11	1000	12	22	995	14
12	1000	12	22	980	11,5
ЭЛС					
13	980	8,2	21	1015	6,4
14	951	8,8	29,2	1030	5,7

Примечание: $\sigma_{во}$ – предел прочности основного металла; $\sigma_{вс}$ – предел прочности сварного шва; δ – относительное удлинение; f^0 – угол загиба.

времени существования жидкометаллической сварочной ванны благодаря выбору режимов сварки не всегда обеспечивает свойства металла шва неразъемного соединения, идентичные свойствам основного металла, поскольку при увеличении времени существования жидкометаллической ванны в ее хвостовой части из-за разницы скоростей теплоотвода и диффузионных процессов создаются неудовлетворительные условия, особенно жидкотекучести и вязкости расплавленного металла, для удаления газовых пузырьков.

К этому необходимо добавить известные положения работ М.Х. Шоршорова, В.Н. Мещерякова [15], в которых изменения свойств околошовной зоны и сварного шва зависят от скоростей охлаждения при термическом цикле сварки. При мягких режимах происходит рост зерна и разогрев металла в околошовной зоне, а при жестких режимах – увеличение зерна, что приводит к уменьшению прочностных свойств в результате образования более резких закалочных структур.

Таким образом, повышение жидкотекучести и уменьшение вязкости жидкометаллической ванны вблизи хвостовой части в условиях увеличения времени ее существования является одной из важнейших задач при сборке титановых конструкций, выполняемых сваркой плавлением.

Дополнительный источник тепла. Для решения вышеуказанной проблемы, связанной с образованием закалочных структур, возможно применение метода, приведенного в работе [17]. Особенностью данного метода является использование W-образного клиновидного вольфрамового электрода с центральной канавкой, который позволяет производить сварку одновременно двумя дугами.

Изменение расстояния t между вершинами W-образного вольфрамового электрода позволяет в широких пределах изменять время существования жидкометаллической ванны.

Результаты исследований влияния расстояния t между вершинами W-образного вольфрамового электрода при различной скорости сварки и силе сварочного тока на исключение пористости в металле шва (заготовки для сварки – лист толщиной 2,5 мм с максимальным количеством капиллярно-конденсированной влаги) и свойства сварного шва в сравнении со сваркой при тех же режимах традиционным стандартным вольфрамовым электродом приведены в табл. 4 и на рис. 2.

Как видно из данных рис. 2, увеличение скорости сварки $V_{св}$ с 2,5 до 5 мм/с традиционным

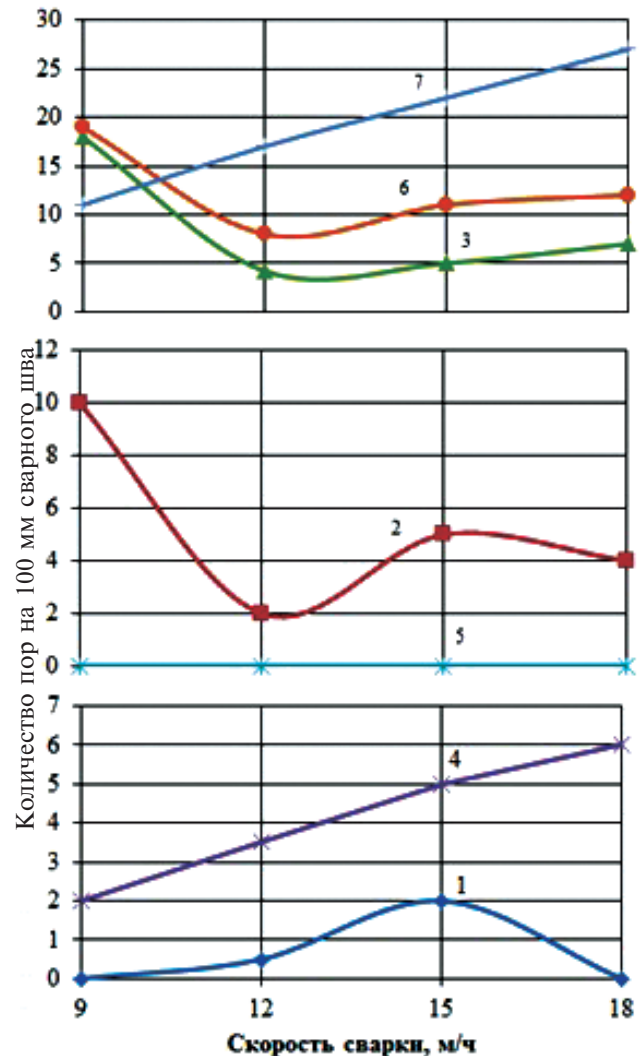


Рис. 2. Влияние ААрДЭС образцов из сплава ВТ20 (100x2,5x500) W-образным вольфрамовым электродом на образование пор на 100 мм сварного шва в зависимости от скорости сварки, расстояния между выступами на рабочем торце электрода t , мм (1-6) в сравнении с традиционным стандартным электродом (7); время сварки (t , мин): 1 – 3,41; 2 – 3,29; 3 – 2,82; 4 – 2,77; 5 – 2,23; 6 – 2,47; сила тока ($I_{св}$, А): 1 – 260; 2 – 240; 3 – 230; 4 – 210; 5 – 200; 6 – 190

стандартным электродом приводит к существенному увеличению количества пор, причем минимум пор наблюдается при скорости сварки 2,5 мм/с (9 м/ч) максимум – при 5 мм/с (918 м/ч), т.е. увеличение времени существования сварочной ванны приводит к уменьшению пор, но не к полному их исключению (рис. 2, кривая 7 – 9 м/ч). Использование W-образного вольфрамового электрода практически при всех режимах сварки за исключением (рис. 2, кривые 3, 6 – 9 м/ч) привело к значительному сокращению пор (рис. 2, кривые 1-6), а в некоторых случаях к полному их

исключению (рис. 2, кривые 1, 5). Эффективность использования W-образного электрода при ААрДЭС титановых сплавов очевидна. Тем не менее исследования механических свойств сварных образцов, полученных по самому лучшему из всех режимов сварки (рис. 2, кривая 5 – ни одной поры в образцах после сварки на различных режимах при $t = 2,23$ мм) показали снижение прочности на 10% сварного образца позиция 7 – минимальная скорость сварки 2,5 мм/с (9 м/ч) и, соответственно, равную прочность образцов сварного шва и основного металла при скорости сварки 4,16 мм/с (15 м/с).

Таким образом, в первом случае время существования жидкометаллической ванны настолько велико, что привело к значительному изменению температурных условий скорости охлаждения, вызвавшему существенные изменения механических свойств сварного шва. Во втором случае двойная дуга W-образного электрода при скорости 4,16 мм/с создала благоприятные температурные условия для дегазации и сохранения требуемых температурных условий охлаждения, обеспечивающие идентичность свойств сварного шва свойствам основного металла. Отсюда следует вывод, что введение дополнительного источника теплового воздействия для поддержания требуемых температурных условий жидкотекучести и вязкости жидкометаллической ванны для удаления пузырьков газа позволяет получать свойства металла шва, одинаковые со свойствами основного металла.

Интенсификация перемешивания жидкометаллической ванны. Широко известен метод сварки погруженным неплавящимся вольфрамовым электродом (СПВЭ) для образования неразъемных соединений, выполненных сваркой плавлением [7, 18–24, 26]. Одним из существенных достоинств СПВЭ является наличие уникальных условий плавления металла, вызывающего перегрев сварочной ванны до температур кипения титана и весьма интенсивное ее перемешивание.

Действие погруженной вольфрамовой дуги интенсивно испаряет из жидкометаллической ванны титан, пары которого обладают высочайшей химической активностью. Время существования жидкометаллической ванны при СПВЭ очень велико, при этом происходит ее самоочищение (рафинирование) в инертной среде, поэтому в сварном шве содержание водорода, кислорода и азота обычно меньше, чем в основном металле.

Как видно из данных табл. 4, свойства металла шва НС, полученного СПВЭ, практически одинаковы со свойствами основного металла.

Содержание газов в металле шва составляет: $H_2 - 0,0033\%$, $O_2 - 0,082\%$, $N_2 - 0,035\%$, при этом уменьшение содержания указанных газов по сравнению с основным металлом составляет соответственно 45, 37 и 12% (см. табл. 2, №11–12).

По проплавливающей способности СПВЭ значительно уступает электронно-лучевой сварке. По сравнению с другими методами сварки ЭЛС имеет ряд преимуществ [23, 25]. В работе [22] приведены результаты сравнительных исследований свойств сварных соединений из сплава ВТ20, выполненных СПВЭ и ЭЛС, из которых следует, что оба способа обеспечивают достаточно стабильные и высокие значения пределов статической и малоцикловой прочности, а также ударной вязкости.

Как видно из данных табл. 4, прочностные свойства металла шва, выполненного ЭЛС, значительно превышают свойства основного металла, причем пластические характеристики несколько ниже. При ЭЛС термический цикл существенно меняется, скорости нагрева и охлаждения, время существования жидкометаллической ванны во многом отличаются от таковых при СПВЭ титановых сплавов. Поэтому при ЭЛС, как и при ААрДЭС титановых сплавов, требуется разработка эффективных методов управления процессами термического цикла сварки, обеспечивающих высокое качество НС при сборке сложнонагруженных ответственных конструкций, выполняемых сваркой плавлением. Наиболее перспективны в этом направлении методы осцилляции процесса сварки плавлением [27].

Таким образом, наиболее эффективным способом улучшения качества неразъемного соединения при сборке конструкций из титановых сплавов сваркой плавлением служит применение колебательных движений электрода или осцилляции электронного луча при электронно-лучевой сварке, которые позволяют создать благоприятные температурные условия для дегазации жидкометаллической ванны и получения свойств, идентичных свойствам основного металла.

Выводы

Исследованиями установлены основные технологические приемы, оказывающие влияние на свойства металла шва неразъемных соединений из титановых сплавов:

1. Режимы сварки с увеличением времени существования сварочной ванны. Эти режимы способствуют исключению пористости, но при этом резко меняется геометрия сварного шва, снижаются прочностные свойства по сравнению с основным металлом вплоть до 15%. Требуется повышение жидкотекучести и уменьшение вязкости жидкометаллической ванны вблизи её хвостовой части, что позволит исключить вышеуказанные недостатки.

2. Использование дополнительного источника тепла, например W-образного вольфрамового электрода, двойная дуга которого создает благоприятные температурные условия для дегазации и сохранения температурных условий охлаждения, обеспечивающих идентичность свойств свариваемого шва свойствам основного металла. Использование дополнительного источника тепла эффективно способствует улучшению качества НС. Недостатком предложенного метода является низкая стойкость W-образного электрода, требуется изыскание других источников тепла, например осцилляция процесса сварки.

3. Интенсификация перемешивания жидкометаллической ванны, например СПВЭ или ЭЛС. Применение ААРДЭС сваркой погруженным вольфрамовым электродом, за счет уникальных условий плавления металла, вызывающего перегрев сварочной ванны до температур кипения и весьма интенсивное её перемешивание, позволяет получать сварные швы со свойствами, идентичными свойствам основного металла. Но СПВЭ по проплавающей способности значительно уступает ЭЛС.

Библиографический список

- Братухин А.Г., Муравьев В.И., Долотов Б.И. и др. Эффективность применения титана и его сплавов в авиастроении // *Авиационная промышленность*. 1997. № 3-4. С. 3-9.
- Муравьев В.И., Бахматов П.В., Фролов А.В. Перспективные металлургические и технологические процессы производства, повышающие надежность изделий из конструкционных материалов. – Комсомольск-на-Амуре: КнАГТУ, 2016. – 330 с.
- Арзамасов Б.Н., Брострем В.А., Буше Н.А. и др. Конструкционные материалы: Справочник. – М.: Машиностроение, 1990. – 688 с.
- Гуревич С.М., Замков В.Н., Блащук В.Е. и др. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов. – 2-е изд., доп. и перераб. – Киев: Наукова думка, 1986. – 240 с.
- Редчиц В.В., Фролов В.А., Казаков В.А., Лукин В.И. Пористость при сварке цветных металлов. – М.: Технология машиностроения, 2002. – 448 с.
- Муравьев В.И. Проблемы порообразования в сварных швах титановых сплавов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2005. № 7(601). С. 30-37.
- Долотов Б.И. Сварка погруженным вольфрамовым электродом. – М.: Машиностроение, 2004. – 208 с.
- Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Лысак В.В. и др. Бездеформационная сварка стрингерных панелей из титанового сплава VT20 // *Автоматическая сварка*. 2014. № 9(735). С. 7-18.
- Лозеев Г.Е., Черницын А.И., Фролов В.В. Процессы, протекающие в стыке сварного соединения, и их влияние на пористость металла шва // *Автоматическая сварка*. 1977. № 2. С. 25-30.
- Долотов Б.И., Муравьев В.И., Марьин Б.Н. и др. О возможности получения плотных швов на титановых сплавах // *Сварочное производство*. 1996. № 12. С. 6-8.
- Муравьев В.И., Физулаков Р.А., Мельничук А.Ф. и др. Исследование влияния газолазерного раскроя на формирование рельефа, структуры и химического состава поверхности реза титановых заготовок // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2005. № 2. С. 22-25.
- Ремчуков С.С., Лебединский Р.Н. Особенности применения лазерных технологий в процессе создания пластинчатых теплообменников для малогабаритных газотурбинных двигателей // *Вестник Московского авиационного института*. 2020. Т. 27. № 2. С. 90-98. DOI: 10.34759/vst-2020-2-90-98
- Kar J., Chakrabarti D., Roy S.K., Roy G.G. Beam oscillation, porosity formation and fatigue properties of electron beam welded Ti-6Al-4V alloy // *Journal of Materials Processing Technology*. 2019. Vol. 266, pp. 165-172. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.10.040
- Муравьев В.И., Бахматов П.В., Долотов Б.И. и др. Обеспечение надежности конструкций из титановых сплавов. – М.: Эком, 2009. – 752 с.
- Шоршоров М.Х., Мещеряков В.Н. Фазовые превращения и изменения свойств сплавов титана при сварке: Атлас. – М.: Наука. 1973. – 160 с.
- Грабин В.Ф. Металловедение сварки плавлением. – Киев: Наукова думка, 1982. – 416 с.
- Меркулов В.И., Долотов Б.И., Муравьев В.И. и др. Способ аргонодуговой сварки титановых сплавов. Патент RU 2133178 С1. Бюл. № 20, 20.07.99.
- Симоник А.Г., Верещагин С.И. Сварка погруженным неплавящимся электродом с регулированием сварочного тока // *Сварочное производство*. 1982. № 3. С. 13-14.
- Косович В.А., Полупан В.А., Панин А.В., Яровинский Ю.Л. Особенности работы вольфрамовых электродов – полых катодов в аргоне при атмосферном давлении // *Сварочное производство*. 1986. № 9. С. 14-15.
- Селяненок В.Н., Степанов В.В., Сайфиев Р.З. Зависимость давления сварочной дуги от параметров вольфрамового электрода // *Сварочное производство*. 1980. № 5. С. 5-7.

21. Зими́на Е.Г., Шубин В.И., Эйду́к Ю.А. Влияние формы вольфрамовых электродов на их эксплуатационные характеристики при сварке // Технологические и эксплуатационные свойства молибденовых и вольфрамовых сплавов: Темат. сб. науч. тр. М.: ВНИИТС, 1991. С. 92-96.
22. Долотов Б.И., Дашковский А.А., Муравьев В.И. и др. Влияние способа сварки на механические свойства сварных швов // Авиационная промышленность. 1992. № 8. С. 46-47.
23. Назаренко О.К., Кайдалов А.А., Ковбасенко С.Н. и др. Электронно-лучевая сварка / Под ред. Б.Е. Патона. — Киев: Наукова думка, 1987. — 256 с.
24. Федоров С.С., Тищенко М.Ю., Шмаков С.В., Зайдес С.А. Особенности сварки высоконагруженных конструкций из титановых сплавов // Сварочное производство. 2016. № 3. С. 16-21.
25. Муравьев В.И., Бахматов П.В., Григорьев В.В. Особенности образования специфических дефектов при сборке крупногабаритных титановых конструкций летательных аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 4. С. 17-27. DOI: 10.34759/vst-2019-4-17-27
26. Kou S., Tsai M.C. Thermal Analysis of GTA Welding Electrodes // Welding research supplement. 1985. Vol. 64. No. 9, pp. 266-269. URI: https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_1985_09_s266.pdf
27. Ольшанская Т.В., Саломатова Е.С. Обзор современных способов управления электронным лучом при электронно-лучевой сварке // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2016. Т. 18. № 4. С. 169-187. DOI: 10.15593/2224-9877/2016.4.13

PROPERTIES ENSURING OF AIRCRAFT TITANIUM STRUCTURES JOINTS OBTAINED BY FUSE WELDING IDENTICAL TO THE BASIC METAL PROPERTIES

Murav'ev V.I.* , Bakhmatov P.V. , Grigor'ev V.V.*****

*Komsomolsk-on-Amur State University (KnASU),
27, Lenin str., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia*

* e-mail: vmuravyev@mail.ru

** e-mail: mim@knastu.ru

*** e-mail: grigorev.vlv@gmail.com

Abstract

Modern aerial vehicles are dynamically developing both structurally and in the field of employing the newest materials, which is being associated with the basic requirements imposed on them, such as ensuring minimum weight and increased strength properties at high alternating loads. The most suitable metallic material meeting the above-said requirements is titanium alloys, which are being actively applied in the aerial vehicles framings. Since the 70s of the last century, the aircraft structural elements have been assembled by welding, while all-in-one joints herewith must meet the unified requirements developed for the industry. As a rule, three welding methods are being employed to form permanent joints in the aircraft building industry. They are welding with a non-melting electrode in a protective gas environment (both traditional and submerged tungsten electrode), and electron beam welding.

An immense experience has been accumulated on the these methods application in the aircraft building industry, nevertheless, each of the methods has a

number of unrealized potential opportunities to improve the permanent joints quality in the field of warping reducing, crack and pore forming, and mechanical properties enhancing to the level of the base metal. The article presents the results of analysis of publications and the authors' own research on the above-mentioned problems. The welding modes impact, the introduction of an additional heat source, and mixing intensification of a liquid-metal bath when applying the basic welding methods are considered.

The authors found that porosity elimination occurred with the life span increase of the welding bath, but, with this, the geometry of the weld seam changes dramatically, strength properties decrease up to 15% compared to the base metal.

With the additional heat source introduction, the bubbles degasification occurs, and the permanent joint properties similar to the base material are being obtained.

Currently, the development of electronic control systems and parameters tracking of the permanent joints forming process allows oscillating both the

trajectory and welding modes, which allows in its turn introduction of pointed dosing of both energy and welding material into a specific point of the welding bath.

Due to the unique properties of metal melting, the possibility of oscillation allows causing the welding bath to overheating up to boiling temperatures, and cause its intensive mixing, which contributes also to obtaining satisfactory permanent joints with the properties similar to the base metal.

Keywords: titanium alloys, all-in-one joints, group assembly, electron beam welding, automatic argon arc welding, aerial vehicles' load bearing elements.

References

1. Bratukhin A.G., Murav'ev V.I., Dolotov B.I. et al. *Aviatsionnaya promyshlennost'*, 1997, no. 3-4, pp. 3-9.
2. Murav'ev V.I., Bakhmatov P.V., Frolov A.V. *Perspektivnye metallurgicheskie i tekhnologicheskie protsessy proizvodstva, povyshayushchie nadezhnost' izdelii iz konstruktsionnykh materialov* (Prospective metallurgical and technological production processes, obtaining reliable products from structural materials), Komsomol'sk-na-Amure, KnAGTU, 2016, 330 p.
3. Arzamasov B.N., Brostrem V.A., Bushe N.A. et al. *Konstruktsionnye materialy. Spravochnik* (Structural materials. Reference Book), Moscow, Mashinostroenie, 1990, 688 p.
4. Gurevich S.M., Zamkov V.N., Blashchuk V.E. et al. *Metallurgiya i tekhnologiya svarki titana i ego splavov* (Metallurgy and technology of titanium and its alloys welding), Kiev, Naukova dumka, 1986, 240 p.
5. Redchits V.V., Frolov V.A., Kazakov V.A., Lukin V.I. *Poristost' pri svarke tsvetnykh metallov* (Porosity at nonferrous metals welding), Moscow, Tekhnologiya mashinostroeniya, 2002, 448 p.
6. Murav'ev V.I. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2005, no. 7(601), pp. 30-37.
7. Dolotov B.I. *Svarka pogruchennym vol'framovym elektrodom* (Welding by tungsten electrode immersion), Moscow, Mashinostroenie, 2004, 208 p.
8. Paton B.E., Lobanov L.M., Lysak V.V. et al. *Avtomaticheskaya svarka*, 2014, no. 9(735), pp. 7-18.
9. Lozeev G.E., Chernitsyn A.I., Frolov V.V. *Avtomaticheskaya svarka*, 1977, no. 2, pp. 25-30.
10. Dolotov B.I., Murav'ev V.I., Mar'in B.N. et al. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1996, no. 12, pp. 6-8.
11. Murav'ev V.I., Fizulakov R.A., Mel'nichuk A.F. et al. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2005, no. 2, pp. 22-25.
12. Remchukov S.S., Lebedinskii R.N. Laser technologies application specifics while plate heat exchangers developing for small-size gas turbine engines. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 2, pp. 90-98. DOI: 10.34759/vst-2020-2-90-98
13. Kar J., Chakrabarti D., Roy S.K., Roy G.G. Beam oscillation, porosity formation and fatigue properties of electron beam welded Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, vol. 266, pp. 165-172. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.10.040
14. Murav'ev V.I., Bakhmatov P.V., Dolotov B.I. et al. *Obespechenie nadezhnosti konstruktssii iz titanovykh splavov* (Ensuring the reliability of structures made of titanium alloys), Moscow, Ekom, 2009, 752 p.
15. Shorshorov M.Kh., Meshcheryakov V.N. *Fazovye prevrashcheniya i izmeneniya svoistv splavov titana pri svarke. Atlas* (Phase transformations and properties changing of titanium alloys while welding. Atlas), Moscow, Nauka, 1973, 160 p.
16. Grabin V.F. *Metallovedenie svarki plavleniem* (Metal science of fusion welding), Kiev, Naukova dumka, 1982, 416 p.
17. Merkulov V.I., Dolotov B.I., Murav'ev V.I. et al. *Patent RU 2133178 C1*, 20.07.99.
18. Simonik A.G., Vereshchagin S.I. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1982, no. 3, pp. 13-14.
19. Kosovich V.A., Polupan V.A., Panin A.V., Yarovinskii Yu.L. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1986, no. 9, pp. 14-15.
20. Selyanenko V.N., Stepanov V.V., Saifiev R.Z. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1980, no. 5, pp. 5-7.
21. Zimina E.G., Shubin V.I., Eiduk Yu.A. *Tekhnologicheskie i ekspluatatsionnye svoistva molibdenovykh i vol'framovykh splavov. Sbornik statei*, Moscow, VNIITS, 1991, pp. 92-96.
22. Dolotov B.I., Dashkovskii A.A., Murav'ev V.I. et al. *Aviatsionnaya promyshlennost'*, 1992, no. 8, pp. 46-47.
23. Nazarenko O.K., Kaidalov A.A., Kovbasenko S.N. et al. *Elektronno-luchevaya svarka* (Electron beam welding), Kiev, Naukova dumka, 1987, 256 p.
24. Fedorov S.S., Tishchenko M.Yu., Shmakov S.V., Zaides S.A. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2016, no. 3, pp. 16-21.
25. Murav'ev V.I., Bakhmatov P.V., Grigor'ev V.V. Specific defects forming features while aircraft bulky titanium structures assembling. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 4, pp. 17-27. DOI: 10.34759/vst-2019-4-17-27
26. Kou S., Tsai M.C. Thermal Analysis of GTA Welding Electrodes. *Welding research supplement*, 1985, vol. 64, no. 9, pp. 266-269. URI: https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_1985_09_s266.pdf
27. Ol'shanskaya T.V., Salomatova E.S. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2016, vol. 18, no. 4, pp. 169-187. DOI: 10.15593/2224-9877/2016.4.13

Редакторы *М.С. Винниченко, Е.Л. Мочина*
Художественное оформление *В.И. Володиной, И.В. Романовой*
Компьютерная верстка *О.Г. Лавровой*

Сдано в набор 6.07.21. Подписано в печать 3.09.21.
Бумага офсетная. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 26,50. Уч.-изд. л. 28,50. Тираж 103 экз. Заказ 079/957.
Цена свободная.

Издательство МАИ
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993
Типография Издательства МАИ
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993