



## ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ВЫПЛАВКИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ НА ИХ СВАРИВАЕМОСТЬ И СЛУЖЕБНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

С. В. АХОНИН, д-р техн. наук, В. Ф. ТОПОЛЬСКИЙ, канд. техн. наук,  
И. К. ПЕТРИЧЕНКО, Э. Л. ВРЖИЖЕВСКИЙ, Р. Н. МИЩЕНКО, инженеры  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрено влияние способа выплавки титановых сплавов по технологии вакуумно-дугового переплава (ВДП) или электронно-лучевой плавки (ЭЛП) с промежуточной емкостью на служебные свойства металла и его свариваемость на примере среднелегированного титанового сплава ВТ6. Показано, что разница в прочностных и пластических характеристиках не существенна. Установлено, что независимо от способа выплавки, вязкость разрушения  $K_{Ic}$  основного металла находится на одном уровне, а вязкость разрушения металла швов, выполненных ЭЛС, в обоих случаях выше, чем в основном металле. Показано, что характеристика циклической трещиностойкости как основного металла титанового сплава ВТ6, полученного разными методами плавления, так и их сварных соединений находится на одном уровне.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, титановые сплавы, вакуумно-дуговой переплав, электронно-лучевая плавка, свариваемость, режимы сварки, структура, механические свойства, трещиностойкость

Традиционным способом производства слитков титановых сплавов, в том числе и ВТ6, является вакуумно-дуговой переплав (ВДП) [1, 2]. В последние годы широкое распространение при выплавке слитков и слябов нелегированного титана и титановых сплавов получила технология электронно-лучевой плавки (ЭЛП) с промежуточной емкостью [3, 4]. За последние десять лет в США и странах СНГ введены в эксплуатацию новые электронно-лучевые установки общей мощностью 26 тыс. т слитков титана в год [5].

Определение влияния способа выплавки металла (ВДП или ЭЛП) на служебные свойства и свариваемость титановых сплавов проводили на примере среднелегированного титанового сплава ВТ6, относящегося к сплавам с системой легирования Ti-6Al-4V, чья доля на мировом рынке составляет более 70 % [1, 2].

Цель настоящей работы состояла в установлении влияния способа выплавки слитков титановых сплавов на их свариваемость, формирование швов, структуру, механические и служебные характеристики сварных соединений, выполненных сваркой плавлением.

**Таблица 1. Химический состав титанового сплава ВТ6 разных способов выплавки (основа — титан)**

Способ выплавки	Содержание легирующих элементов и примесей, мас. %						
	Al	V	Fe	C	O	N	H
ВДП	5,5	4,00	0,25	0,100	0,096	0,05	0,015
ЭЛП	5,8	3,95	0,26	0,015	0,130	0,02	0,003

Для проведения исследований из выплавленных на ГП «НПЦ «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины» по технологии ЭЛП слитков титанового сплава ВТ6 способом горячей прокатки на двухвалковом реверсивном стане получили листы толщиной 3, 5 и 12 мм. Используемый для исследований металл, выплавленный способом ВДП, брали в виде готовых листов ВТ6 толщиной 12 мм, которые затем катали до толщины 3 и 5 мм. При этом для получения мелкозернистой однородной структуры 60 % деформации осуществляли в  $\beta$ -области (при температуре выше 980 °С), а оставшиеся 40 % — в  $(\alpha + \beta)$ -области (950...860 °С).

Анализ химического состава используемого проката показал (табл. 1), что содержание легирующих элементов в металле обоих способов выплавки является близким.

Сварку опытных образцов выполняли наиболее широко применяемыми для титана способами аргонодуговой (АДС) и электронно-лучевой сварки (ЭЛС).

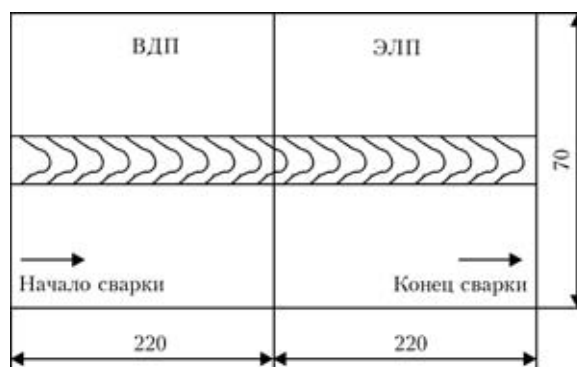


Рис. 1. Схема сварки образцов способами АДС, АДС по флюсу и ЭЛС



Т а б л и ц а 2. Параметры стыковых сварных соединений сплава ВТ6, выполненных различными способами сварки

Способ сварки	Толщина металла, мм	Способ выплавки	Параметры режима сварки			Параметры сварного соединения				
			$I_{св}, А$	$U, В$	$\gamma_{св}, М/ч$	ширина шва сверху, мм	ширина шва в корне, мм	высота корня шва, мм	ширина ЗТВ, мм	
									сверху	в корне
АДС	3	ВДП	180	12	12	10,5	3,0	0,25	4,2	7,8
		ЭЛП	180	12	12	11,0	2,5	0,20	4,4	8,1
	5	ВДП	385	14	30	7,5	4,0	0,30	2,0	3,2
		ЭЛП	385	14	30	8,5	3,0	0,25	1,5	4,0
АДС по слою флюса	3	ВДП	135	9	12	5,5	5,5	0,30	3,3	3,0
		ЭЛП	135	9	12	5,8	5,2	0,20	3,2	3,4
	5	ВДП	250	11	12	8,5	8,0	0,50	4,0	5,0
		ЭЛП	250	11	12	9,0	6,0	0,40	3,5	4,5
ЭЛС	5	ВДП	$I_{двч} = 38 \text{ мА}$	$U_{вск} = 60 \text{ кВ}$	25	5,2	2,1	0,16	2,1	3,1
		ЭЛП			25	6,0	1,3	0,100	1,4	3,8
	12	ВДП	$I_{двч} = 75 \text{ мА}$	$U_{вск} = 60 \text{ кВ}$	25	3,8	3,5	2,00	1,5	1,0
		ЭЛП			25	4,0	2,9	1,60	1,5	1,0
АДС с разделкой кромок проволокой ВТ6св	12	ВДП	110; 180; 230	15; 9; 9	15	11	4	1,40	4,0	4,0
		ЭЛП								
АДС кромок проволокой CG15cd	12	ВДП	110; 180; 230	15; 9; 9	20	10	4	1,30	4,0	4,0
		ЭЛП								

АДС проводили неплавящимся вольфрамовым электродом в аргоне по слою флюса, а также проникающей дугой с использованием установки ОБ-2146 со сварочной горелкой А-1272 и источником питания ВСВУ-630. При сварке по слою флюса применяли флюс АНТ-25А и опытный флюс ОБ-3, в качестве сварочной проволоки — ВТ6св диаметром 1,2 и СП15 диаметром 2 мм.

ЭЛС выполняли в установке УЛ-144, оснащенной источником питания ЭЛА-60/60, сварочной пушкой ЦФ-4 и прибором управления лучом СУ-220.

Для выявления внутренних дефектов применяли рентгенопросвечивание сварных образцов на установке РАПС/300-70 с использованием пленки Т-4, что позволило обнаружить дефекты, размеры которых составляли не менее 2...3 % толщины металла. Для обнаружения дефектов, размеры которых не разрешались рентгеновским методом, проводили металлографический анализ поперечных и продольных шлифов на микроскопе «Neophot». Шлифы подготавливали по обычной для титановых сплавов методике [6].

При всех способах сварку образцов осуществляли по схеме, приведенной на рис. 1, оптимальный режим, обеспечивающий отсутствие дефектов в сварном соединении, удовлетворительное формирование лицевой стороны шва и корня (табл. 2) подбирали на сплаве, полученном ВДП такой же толщины. Для снятия остаточных напряжений после сварки все сварные соединения

подвергали отжигу при температуре 750 °С 1 ч и охлаждению на воздухе.

Анализ параметров сварных соединений (табл. 2) показал явную тенденцию к увеличению сварочного тока при сварке сплавов, выплавленных способом ЭЛП независимо от способа сварки. Следовательно, для достижения оптимальных параметров сварных соединений, полученных на сплавах, выплавленных способом ВДП, необходимо на сплавах, выплавленных способом ЭЛП, увеличивать сварочный ток при сварке всеми перечисленными способами на 10...12 %, что, возможно, обусловлено более высокой плотностью металла, выплавленного способом ЭЛП, по сравнению с металлом, полученным ВДП [7].

Изготовленные пластины и их сварные соединения для оценки качества подвергали статическому растяжению и ударному изгибу. Определяли вязкость разрушения  $K_{1c}$  и скорость роста трещины усталости (СРТУ).

Использование специальных галогенидных флюсов (АНТ-25А, ОБ-3) позволяет осуществлять сварку титановых листов толщиной до 6 мм за один проход. Применение флюса ОБ-3 позволяет на 25 А уменьшить сварочный ток по сравнению с использованием флюса АНТ-25А. Подача присадочной проволоки при сварке металла толщиной 5 мм в первый проход обусловлена необходимостью исключения подрезов. При сварке металла больших толщин применяют способ сварки с разделкой кромок. В этом случае доля приса-



Таблица 3. Механические характеристики сплава ВТ6 и его сварных соединений

Способ сварки и марка сварочной проволоки	Толщина металла, мм	Способ выплавки	Основной металл		Сварное соединение			Место разрушения
			$\sigma_B$ , МПа	$KCV$ , Дж/см <sup>2</sup>	$\sigma_B$ , МПа	$KCV$ , Дж/см <sup>2</sup>		
						шов	ЗТВ	
АДС по слою флюса	5	ВДП	970	42	950	30	32	Шов
		ЭЛП	980	36	970	27	30	» »
АДС по слою флюса сварочной проволокой: ВТ6св	5	ВДП	970	42	955	32	38	» »
СП15св	5				968	32	38	ЗТВ
ВТ6св	5				975	27	38	Шов
СП15св	5	ЭЛП	980	36	980	32	38	ЗТВ
АДС с разделкой кромок: ВТ6св	12	ВДП	950	40	940	30	34	Шов
СП15св	12				952	33	34	ЗТВ
ВТ6св	12	ЭЛП	1000	35	950	27	32	Шов
СП15св	12				998	30	32	ЗТВ
ЭЛС	12	ВДП	960	45	960	40	37	ОМ
		ЭЛП	1010	37	1020	30	28	» »

Примечание. Приведены средние значения по результатам испытаний пяти образцов.

дочного металла составляет приблизительно 70...80 % объема металла шва. Для получения сварного соединения, близкого по прочности основному металлу (ОМ), необходимо применять более легированную присадочную проволоку. Такие свойства при сварке с разделкой кромок обеспечивает сварочная проволока СП15св, разработанная ранее в ИЭС им. Е. О. Патона. Для сравнения сварку с разделкой кромок проводили с использованием присадочной проволоки ВТ6св (табл. 3).

Исследования микроструктуры сварных соединений сплава ВТ6 толщиной 5 мм, выполненных АДС по слою флюса (проникающей дугой) на металле ЭЛП, показали (рис. 2, а-в), что ОМ имеет преимущественно глобулярную структуру, хотя наблюдаются и участки с пластинчатой структурой, а металл шва и околошовного участка ЗТВ характеризуется наличием грубоигольчатой мартенситной  $\alpha'$ -фазы.

Соответствующие зоны сварного соединения сплава ВТ6, полученного способом ВДП, имеют аналогичные структуры (рис. 2, г, д).

ОМ, полученный по способу ЭЛП, после прокатки до толщины 5 мм имеет меньшую степень глобуляризации  $\alpha$ -фазы в структуре, чем металл, выплавленный ВДП. Отмеченные особенности связаны с некоторыми отличиями в режимах прокатки сплавов, выплавленных различными способами. Однако структуры металла шва и ЗТВ идентичны и сходны со структурой соответствующих участков сварного соединения, выполненного АДС на металле толщиной 3 и 12 мм, хотя

структуры ОМ отличаются (металл, выплавленный ВДП, имеет глобулярно-пластинчатую, а ЭЛП — глобулярную структуру).

Применение флюса при сварке (АДС по флюсу) не внесло существенных изменений в структуру сварного соединения.

Механические свойства ОМ и сварных соединений, полученных способами АДС по слою флюса, АДС с разделкой кромок и ЭЛС после отжига при температуре 750 °С для снятия остаточных напряжений, приведены в табл. 3. Анализ полученных результатов показывает, что сварные соединения, выполненные сквозным проплавлением с одновременной подачей присадочной проволоки СП15св, а также с разделкой кромок этой проволокой, имеют прочность и пластичность практически на уровне ОМ. Эти же соединения, выполненные с присадочной проволокой ВТ6св, имеют показатели несколько ниже как по прочности, так и по пластичности. Что касается ЭЛС, то независимо от способа выплавки сплава прочность сварных соединений находится на уровне ОМ, ударная вязкость металла шва и ЗТВ составляют около 80...85 % ударной вязкости ОМ, что соответствует технологическим рекомендациям, а также требованиям отечественных и зарубежных стандартов к сварным соединениям сплава ВТ6 или его аналога Grade 5.

Разница прочностных характеристик сварных соединений, выполненных на металле, полученных способами ВДП и ЭЛП, незначительна, а ударная вязкость металла шва и ЗТВ зависит не столько от способа выплавки свариваемого ме-

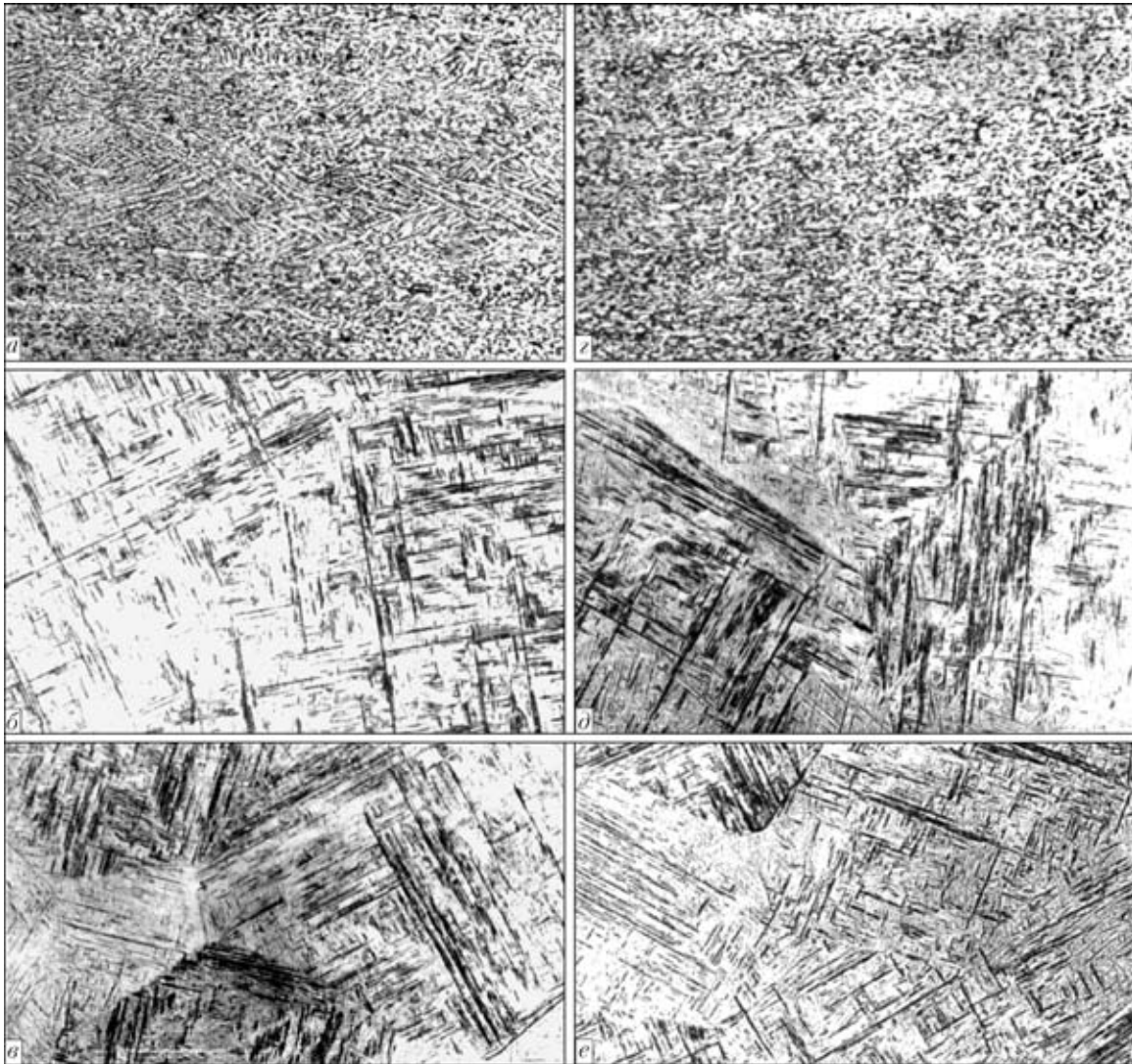


Рис. 2. Микроструктура ( $\times 200$ ) металла сварного соединения сплава ВТ6, полученного ЭЛП (а-в) и ВДП (г-е), толщиной 5 мм, выполненного АДС проникающей дугой: а, г — ОМ; б, д — шов; в, е — металл ЗТВ

талла, сколько от способа сварки. Ударная вязкость в металле ЗТВ после АДС выше, чем в шве, в то время как при ЭЛС наблюдается обратная тенденция.

К числу наиболее важных характеристик, определяющих работоспособность сварных соединений из высокопрочных титановых сплавов, относятся также характеристики вязкости разрушения  $K_{1c}$  и СРТУ. Вязкость разрушения на воздухе  $K_{1c}$  определяет сопротивляемость материала разрушению при статическом или усталостном нагружении при наличии в нем трещин. Оценку величины  $K_{1c}$  ОМ и металла сварных соединений титановых сплавов, выплавленных ВДП и ЭЛП, осуществляли в соответствии с нормативным документом ASTM E 399-90.

Испытания сварных соединений титанового сплава ВТ6, проведенные согласно указанной выше методики, позволили определить вязкость разрушения  $K_{1c}$  для металла, выплавленного ЭЛП и ВДП, толщиной 12 мм (табл. 4). Анализ полу-

Таблица 4. Показатели вязкости разрушения ОМ и сварных соединений, выполненных ЭЛС

№ образца	Способ выплавки сплава (участок соединения)	$K_{1c}$ , МПа $\sqrt{м}$
1	ЭЛП (ОМ)	65,9
2		54,0
3		62,6
4	ЭЛП (металл ЗТВ при ЭЛС)	73,9
5		69,4
6		74,2
7	ВДП (ОМ)	62,2
8		61,9
9		54,4
10	ВДП (металл ЗТВ при ЭЛС)	66,8
11		78,3
12		77,9
13		79,3

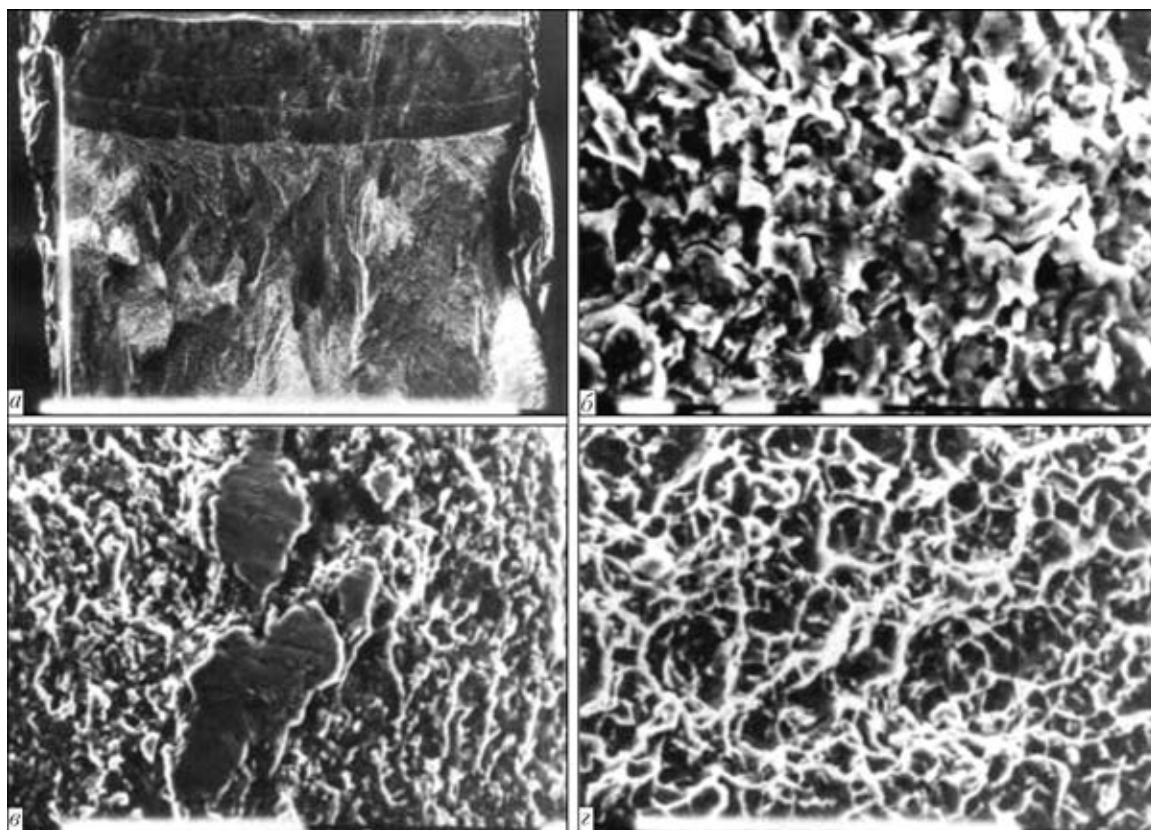


Рис. 3. Вид излома (*a*,  $\times 10$ ) и фрактографическая картина поверхности образца титанового сплава, полученного способом ЭЛП (пояснения *b–г* см. в тексте)

ченных результатов показал, что титановые сплавы, выплавленные методом ВДП и ЭЛП, как и их сварные соединения, очень близки по показателю вязкости разрушения ( $K_{1c}$  ОМ соответственно 61,3 и 60,8 МПа $\sqrt{м}$ , а  $K_{1c}$  сварного соединения — 78,5 и 72,5 МПа $\sqrt{м}$ ).

Важно отметить, что вязкость разрушения металла сварных соединений выше, чем у ОМ. По мнению авторов работы [8], последнее связано с различной структурой ОМ (преобладает глобулярная) и сварного соединения (пластинчатая крупнозернистая структура). В пластинчатой структуре наблюдаются более резкие изменения направления движения трещин, чем в глобулярной, а иногда и их ветвление с образованием вторичных трещин. Происходящее в результате этих процессов увеличение общей длины трещины требует большей энергии и включает большие объемы металла в работу пластической деформации.

После испытаний исследовали изломы разрушенных образцов. На рис. 3, *a* представлен общий вид поверхности излома ОМ. В его верхней части, где от надреза развивалась усталостная трещина, наблюдаются три ступени ее скачкообразного роста, механизм разрушения является квазисколом с элементами вязкого разрушения (рис. 3, *b*). Переход от зоны распространения усталостной трещины к зоне распространения трещины при статическом нагружении образца представлен на

рис. 4, *в*. В этой части образца преобладает вязкий характер разрушения с участками расслоения, которые, по-видимому, возникают при распространении трещины вдоль устойчивых полос скольжения. Если в начальной зоне распространения магистральной трещины от статической нагрузки на фоне ямочного излома встречаются единичные фасетки квазискола, то по мере ее дальнейшего продвижения элементы квазихрупкого разрушения исчезают, и строение излома становится исключительно ямочным (рис. 3, *г*).

Поверхность излома образца ОМ сплава ВТ6, выплавленного способом ВДП, имеет аналогичное строение.

Несмотря на различие структуры мелкозернистого ОМ и крупнозернистого металла шва, микроструктура изломов образцов сварных соединений, выполненных ЭЛС, сходна со структурой аналогичных участков изломов образцов ОМ. На участке развития усталостной трещины преобладающим механизмом разрушения является квазискол, а переход к распространению трещины от статической нагрузки сопровождается увеличением количества вязких элементов в строении излома.

Таким образом, проанализировав результаты сравнительных испытаний вязкости разрушения ОМ — сплава ВТ6, выплавленного способами ВДП и ЭЛП, и его сварных соединений, выполненных ЭЛС, можно сделать вывод, что для из-

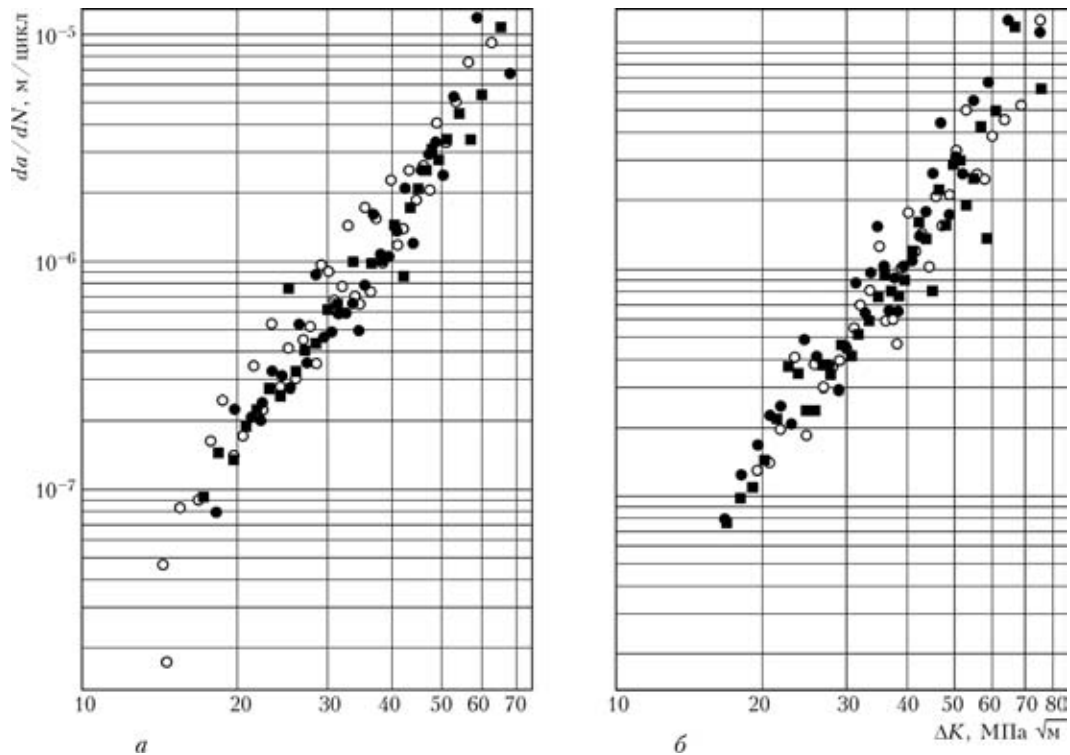


Рис. 4. Кинетическая диаграмма усталостного разрушения металла шва сварных соединений титанового сплава ВТ6, выполненных ЭЛС: а — ЭЛП; б — ВДП

ломов образцов ОМ и металла швов основным механизмом разрушения в зоне развития усталостной трещины является квазискол. При дальнейшем продвижении трещины под действием статической нагрузки в изломах образцов ОМ наблюдается переход к вязкому разрушению, а в изломах образцов металла швов — преимущественно к межзеренному вязкому разрушению.

Усталостные испытания на циклическую трещиностойкость [8, 9] образцов ОМ сплава ВТ6, выплавленного способами ВДП и ЭЛП, и металла швов, выполненных ЭЛС, проводили в соответствии с требованиями стандарта ASTM-E647-93. Испытывали плоские образцы сечением 60×4 мм с центрально расположенным трещиноподобным дефектом. В сварных образцах определяли закономерности роста усталостных трещин при их развитии в металле швов.

Центрально расположенный трещиноподобный дефект выполняли в виде кругового отверстия радиусом 1,5 мм и механических надрезов, равных 1,5 мм. Затем при циклической нагрузке с размахом напряжений, меньшим размаха напряжений при испытании, выращивали трещины в обе стороны надрезов до достижения одной из них длины 1 мм. Полученный центрально расположенный дефект принимали за усталостную трещину для дальнейшего исследования кинетики усталостного разрушения образцов.

Скорость роста усталостной трещины определяли как отношение приращений длины трещины к соответствующему приращению количества

циклов перемен напряжений, а размах коэффициента интенсивности напряжений вычисляли для среднего значения длины трещины. В результате обработки экспериментальных данных построили кинетические диаграммы усталостного разрушения как для ОМ, выплавленного ВДП и ЭЛП, так и для их сварных соединений, выполненных ЭЛС (рис. 4). На полученных кинетических диаграммах усталостного разрушения экспериментальные данные охватывают диапазон изменения скорости от  $0,5 \cdot 10^{-8}$  до  $10^{-5}$  м/цикл и соответствующий этим скоростям диапазон изменения размаха коэффициента интенсивности напряжений от 15 до 75 МПа $\sqrt{\text{м}}$ , что соответствует линейному (парисовскому) участку кинетических диаграмм усталостного разрушения.

Фрактографические исследования изломов разрушившихся образцов после усталостных испытаний показали, что в зоне медленного развития трещины как в ОМ, так и в металле швов превалирующим является квазихрупкое разрушение. При переходе в зону ускоренного развития трещины характер разрушения ОМ и сварных швов становится смешанным. Наряду с элементами квазихрупкого разрушения появляются элементы вязкого разрушения, в частности, в швах наблюдаются преимущественно элементы межзеренного вязкого разрушения. В зоне долома наблюдается преимущественно межзеренное вязкое разрушение.

Анализ результатов испытаний циклической трещиностойкости показал, что скорость роста ус-



талостной трещины ОМ титанового сплава VT6, полученного различными способами плавки (ВДП или ЭЛП), а также металла шва их стыковых соединений, выполненных ЭЛС, практически одинакова. Это следует из того, что все экспериментальные данные соответствующих кинетических диаграмм усталостного разрушения с учетом зоны их рассеяния практически совпадают, образуя единую зону рассеяния.

Таким образом, проведенный комплекс исследований показал, что свариваемость и служебные характеристики титанового сплава VT6, полученного различными способами плавки (ВДП или ЭЛП), а также его сварных соединений практически совпадают. Полученные результаты подтверждают перспективность использования передовой технологии ЭЛП для получения титановых сплавов.

### Выводы

1. Для получения мелкозернистой однородной структуры в деформированном высокопрочном сплаве (VT6), выплавленном способом ЭЛП, прокатку необходимо вести в  $\beta$ -области до деформации 55...60 % и 40...45 % в двухфазной ( $\alpha + \beta$ )-области.

2. Для получения оптимальных равнозначных параметров соединений при сварке сплавов, полученных ЭЛП, необходимо увеличивать сварочный ток на 10...12 % по сравнению со сваркой сплавов, полученных способом ВДП.

3. Показано, что независимо от способа выплавки сплава VT6 прочность сварных соединений, выполненных ЭЛС, находится на уровне ОМ, а ударная вязкость металла шва и ЗТВ соответствуют 80...85 % ОМ. Аналогичные характеристики обеспечиваются при АДС с применением сварочной проволоки СП15св.

4. Установлено, что независимо от способа выплавки сплава VT6 вязкость разрушения  $K_{Ic}$

находится на одном уровне, а вязкость разрушения металла швов, выполненных ЭЛС, в обоих случаях выше, чем в ОМ.

5. Титановые сплавы, полученные способом ЭЛП, и их сварные соединения полностью отвечают требованиям стандартов и ASTM и не уступают по качеству сплавам, выплавленным способом ВДП, и соответствующим сварным соединениям.

6. Установлено, что циклическая трещиностойкость ОМ титанового сплава VT6, полученного различными способами плавки (ВДП, ЭЛП), а также металла шва стыковых соединений, выполненных ЭЛС, практически одинакова.

7. Сплавы, выплавленные способом ЭЛП, могут быть рекомендованы к применению в различных отраслях народного хозяйства при изготовлении ответственных сварных конструкций.

1. Mitchel A. The production of high-quality materials by special process // J. Vac. Technol. — 1987. — № 4. — P. 2672–2677.
2. Seagle S. R. New titanium developments in products, processes and applications in the USA // Titanium 1990. Intern. Conf., Dayton, USA, 1990. — Vol. 1. — P. 66–73.
3. Poulsen E., Chinnis W., Mede M. Status of titanium cold hearth melting // Proc. of the Ninth world conf. on titanium. — Saint Petersburg, 7–11 June 1999. — Saint Petersburg: Prometey, 1999. — P. 1541–1544.
4. Некоторые тенденции развития металлургического перелома титана / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин и др. // Пробл. спецэлектрометаллургии. — 1996. — № 1. — С. 25–31.
5. Электронно-лучевая плавка титана / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин и др. — Киев: Наук. думка, 2006. — 246 с.
6. Металлография титановых сплавов / Е. А. Борисова, Г. А. Бочвар, М. Я. Брун и др. — М.: Металлургия, 1980. — 464 с.
7. Электронно-лучевая плавка / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин и др. — Киев: Наук. думка, 1997. — 265 с.
8. Боек Д. Основы механики разрушения. — М.: Высш. шк., 1980. — 368 с.
9. Троценко В. Г., Покровский В. В., Прокопенко Д. В. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении. — Киев: Наук. думка, 1987. — 251 с.

The influence of the method of titanium alloy production by the process of vacuum-arc remelting (VAR) or electron beam melting with an intermediate crucible (EBM) on the metal performance and its weldability is considered in the case of medium-alloyed titanium alloy VT6. It is shown that the difference in the strength and ductility properties is negligible. It is established that irrespective of the production process, the fracture toughness KIC of the base metal is on the same level, and fracture toughness of the metal of EB welds is higher than that of the base metal in both the cases. The characteristic of cyclic crack resistance of both the base metal of VT6 titanium alloy produced by different melting processes and of its welded joints is shown to be on the same level.

Поступила в редакцию 26.01.2007