

УДК 621.789:620.18

**Особенности формирования сварного шва при имитации электронно-лучевой сварки
толстостенных образцов ВТ6, полученных электронно-лучевой аддитивной
технологией**

А.А. Яхин¹, С.А. Мартынов²

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. А.В. Панин

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
Россия, г. Томск, пр. Академический 2/4, 634055

E-mail: albertodebertto@mail.ru

**Weld formation features in bead-on-plate electron beam welding of thick-walled VT6 samples
obtained by electron beam additive manufacturing**

A.A. Iakhin¹, S.A. Martynov²

Scientific Supervisor: Prof., Dr. A. V. Panin

¹Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

²Institute of Strength Physics and Materials Science, Russia, Tomsk, Akademicheskii str., 2/4, 634055

E-mail: albertodebertto@mail.ru

Abstract. *This paper presents a comparative analysis of the geometry of weld zones of wrought and electron beam additive manufactured (EBAM) VT6 titanium alloy thick-walled samples. Bead-on-plate electron beam welding (EBW) was carried out by single-pass movement of the electron beam across the VT6 samples. The results of metallographic studies have demonstrated that the penetration of the EBAM VT6 samples during EBW was higher than that of the wrought VT6 samples under the same EBW conditions. The influence of the trajectory scans of the electron beam on the appearance of defects in the seams, consisted fine martensitic α/α' needles inside prior β columnar grains has been shown.*

Key words: *electron beam additive manufacture; titanium alloys; VT6 (BT6/Ti64); electron beam welding; beam scan.*

Введение

Перспективным методом получения неразъёмных соединений толстостенных изделий из титановых сплавов, в частности ВТ6 (аналог Ti6Al4V, Ti64), является электронно-лучевая сварка (ЭЛС), характеризующаяся высокой энергоэффективностью, превосходной точностью и качеством сварных соединений. Несмотря на перечисленные преимущества остаются вопросы подбора оптимального режима сварочного процесса как для традиционно, так и для аддитивно полученных титановых изделий [1]. Как известно, режимы сварки тонкостенных изделий, полученных традиционными методами штамповки и прокатки, не подходят для сварки тонкостенных 3D-напечатанных деталей. К тому же, существуют значительные отличия в закономерностях сварки тонкостенных и толстостенных изделий. Более того исследований, направленных на изучение особенностей сварки толстостенных 3D-напечатанных изделий, практически не представлено. Таким образом, целью данного исследования является сравнительный анализ особенностей формирования сварного шва при ЭЛС толстостенных образцов ВТ6, полученных прокаткой и электронно-лучевой аддитивной технологией (ЭЛАТ).

Экспериментальная часть

Заготовка в виде прокатанного прутка из титанового сплава ВТ6 диаметром 14 мм, полученная горячекатаным методом, была в состоянии поставки (ГОСТ 26492-85). Аддитивно

полученные заготовки были изготовлены методом ЭЛАТ на установке для проволочного электронно-лучевого аддитивного производства (ИФПМ СО РАН, Россия). Химический состав проволоки для 3D-печати соответствовал стандартам ASTM B348. Из заготовок методом электроэрозионной резки вырезались образцы 10x10x50 мм. В качестве имитации ЭЛС проводилось однократное «переплавление валика» (термин ГОСТ Р 58904-2020/ISO/TR 25901-1:2016) на поверхности исследуемых образцов вдоль их сечения 10x10 на установке для проволочного электронно-лучевого аддитивного производства (ИФПМ СО РАН, Россия). Параметры имитации ЭЛС приведены в табл. 1. Фотографии микроструктуры образцов были получены при помощи оптического микроскопа AXIOVERT-200MAT.

Таблица 1

Параметры при различных режимах имитации ЭЛС

Номер режима	Сила тока пучка I, мА	Скорость движения луча U, мм/мин	Частота развертки, Гц	Вид развертки
1	105	1600	150	точка
2	70	1600	150	точка
3	70	1600	без развёртки	статический луч
4	105	1600	без развёртки	статический луч
5	105	2000	без развёртки	статический луч

Результаты

При всех режимах имитации ЭЛС как прокатанных, так и ЭЛАТ образцов ВТ6 можно выделить следующие сформированные зоны: СШ-сварной шов, ЗТВ-зона термического влияния и ОМ-основной металл. Зона сплавления (ЗС) характеризует глубину проплавления и представляет собой границу между жидкой ванной расплава и твердым металлом ЗТВ. Как видно из рис. 1а, в и таблицы 2, глубина проплавления ЭЛАТ образцов ВТ6 больше, чем образцов ВТ6 из прокатанного прутка, что обусловлено более высокой теплопроводностью, соответствующей крупным первичным β зернам исходной микроструктуры. К тому же повышенная теплопроводность аддитивных образцов подтверждается более широкими размерами ЗТВ и сварного шва ЭЛАТ образцов ВТ6 (табл. 2), в отличие от прокатанных образцов ВТ6. В ЭЛАТ образцах ВТ6 невозможно выделить ближнюю и дальнюю зоны термического влияния (БЗТВ и ДЗТВ), в связи с отсутствием рекристаллизации крупных зерен исходной микроструктуры ЭЛАТ образцов ВТ6, в сравнении с заметным ростом мелкозернистой структуры исходных прокатанных образцов ВТ6 в процессе имитации ЭЛС (рис. 1, а и в).

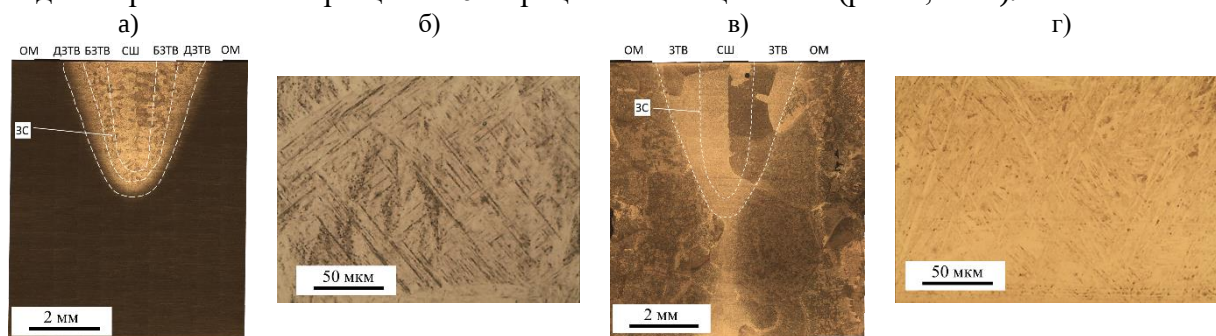


Рис. 1. Внешний вид сварных соединений, полученных при имитации ЭЛС по режиму 5 – прокатанный образец ВТ6 (а), ЭЛАТ образец ВТ6 (в); изображение микроструктуры сварного шва - прокатанный образец ВТ6 (б), ЭЛАТ образец ВТ6 (г)

Микроструктура сварных швов как прокатанных образцов ВТ6, так и аддитивных образцов ВТ6 представлена мартенситными пластинами α/α' -фазы (рис. 1, б и г) внутри столбчатых первичных β зерен. При этом в прокатанных образцах ВТ6 наблюдается их эпитаксиальный характер роста ортогонально по отношению к оси сварного шва. В то время

как внутри сварных швов ЭЛАТ образцов ВТ6 формируются крупные вертикально ориентированные первичные β зерна (рис. 1, в).

Таблица 2

Геометрические размеры сварных зон, сформированных в прокатанных и ЭЛАТ образцах ВТ6 при имитации ЭЛС по режиму 5

Образцы	Сварной шов			Зона термического влияния		
	Глубина проплавления, мм	Ширина шва, мм	Ширина вершины шва, мм	Средняя ширина ближней ЗТВ, мм	Средняя ширина дальней ЗТВ, мм	Средняя ширина ЗТВ, мм
Прокат прутки ВТ6	3,46	1,26	1,57	2,27	3,42	-
ЭЛАТ ВТ6	4,26	1,52	1,72	-	-	3,64

Стоит отметить, важную роль применения развертки электронного луча именно для ЭЛАТ образцов ВТ6, в отличие от случая с прокатанными образцами ВТ6. Так режимы имитации ЭЛС с разверткой «Точка» практически не оказывают влияния на формирование сварного шва при имитации ЭЛС прокатанных образцов ВТ6. Напротив, с одной стороны, применение развертки «Точка» предотвращает появление крупных пор в сварных швах ЭЛАТ образцов ВТ6. С другой стороны, отсутствие развертки, т.е. применение «статического луча», при имитации ЭЛС приводит к формированию в сварном шве более крупных первичных β зерен.

Заключение

В результате проведенных исследований сварных швов, полученных при различных режимах имитации электронно-лучевой сварки прокатанных и ЭЛАТ образцов ВТ6 можно сделать следующие выводы:

1. Толстостенные ЭЛАТ образцы ВТ6 характеризуются большей глубиной проплавления, шириной шва, шириной вершины шва и размерами зоны термического влияния, в отличие от толстостенных прокатанных образцов ВТ6.
2. Режимы ЭЛС для толстостенных прокатанных образцов ВТ6 не подходят для сварки толстостенных ЭЛАТ образцов ВТ6, в связи возникновением сварочных дефектов и формированием крупных первичных β зерен, ориентированных вертикально вдоль оси сварного шва.
3. Применение развертки электронного луча «Точка» снижает возникновение сварочных дефектов в большей степени для ЭЛАТ образцов ВТ6, чем для прокатанных образцов ВТ6.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0010. Результаты получены с применением оборудования ЦКП НОИЦ НМНТ ТПУ.

Список литературы

1. Węglowski M.St., Błacha S., Phillips A. Electron beam welding – Techniques and trends – Review // Vacuum. – 2016. – Vol. 130. – P.72–92. – (DOI:10.1016/j.vacuum.2016.05.004)