

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ ИЗДЕЛИЙ
ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti-6Al-4V, ПОЛУЧЕННЫХ ТРАДИЦИОННЫМИ
И АДДИТИВНЫМИ МЕТОДАМИ**

А. Яхин

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

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: albertodebertto@mail.ru

**COMPARATIVE ANALYSIS OF Ti-6Al-4V TITANIUM ALLOY ELECTRON BEAM WELDING
PARTS OBTAINED BY TRADITIONAL MANUFACTURING AND ADDITIVE MANUFACTURING**

A. Iakhin

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

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

E-mail: albertodebertto@mail.ru

Abstract. *The microstructure and microhardness has been investigated in electron-beam welded Ti-6Al-4V alloy parts obtained by traditional manufacturing and additive manufacturing. Electron-beam welding produced three discriminative zones (FZ – the fusion zone, HAZ – the heat affected zone, BM - the base metal) in the welded material obtained by both rolled and EBF³ processes. The results of the research show that a grain size of the FZ and the HAZ depends on a grain size in the BM. Additionally, the FZ was typified by an entirely acicular α' microstructure formed by a displacive transformation within prior β grains on cooling. The microhardness in the FZ reduced towards the HAZ upon increasing distance from the weld centre.*

Введение. В настоящее время широко исследуются аддитивные методы создания металлических изделий. Одним из перспективных направлений является 3D-печать титановыми сплавами [1]. Однако данные методы пока не позволяют получить полностью готовое изделие крупных размеров. Тем самым ставится вопрос соединения полученных аддитивным способом материалов и деталей. Одним из традиционных методов соединения металлов является сварка. Электронно-лучевой метод получения сварных соединений высоко технологичен так как, регулируя мощность и ширину пучка, фокусировку, траекторию движения луча в зоне шва и др. параметры, можно менять глубину и ширину сварочной ванны, тем самым добиваясь требуемых физико-механических свойств соединений в соответствии с условиями эксплуатации конструкций. Применение данного метода для сварки традиционно полученных материалов достаточно хорошо изучено [2], в отличие от сварки 3D-напечатанных изделий. Таким образом, целью данной работы является исследование электронно-лучевой сварки изделий из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных традиционными и аддитивными методами.

Экспериментальная часть. Исследования проводили на образцах сплава Ti-6Al-4V, полученных прокаткой и EBF³ (Electron-beam freeform fabrication – электронно-лучевое изготовление свободной формы). Прокатанные образцы были в состоянии поставки, ГОСТ 22178-76. Образцы EBF³ были изготовлены на установке электронно-лучевой сварки ЭЛУ-9, оборудованной аппаратным и

программным комплексом 6E400, в вакууме $133 \times (10^{-4} - 10^{-5})$ Па [3]. В ходе процесса EBF³ использовалась проволока диаметром 1,6 мм из сплава титана марки Grade 5, её плавление осуществлялось пушкой с плазменным катодом с ускоряющим напряжением – 30 кВ, током пучка - 20 мА и скоростью подачи проволоки 2 м/мин под углом 35° к поверхности подложки. Электронно-лучевая сварка проводилась на установке ЭЛУ-9. Параметры ЭЛС представлены в таблице 1. Перед сваркой поверхности сопряжения тщательно очищались. Образцы подвергались двухсторонней сварке без разделки кромок.

Таблица 1

Параметры электронно-лучевой сварки исходных образцов

Образцы	Толщина свариваемых пластин, мм	Ускоряющее напряжение, кВ	Ток пучка, мА	Скорость сварки, мм/мин
Прокат	2	30	25	900
EBF ³	6	30	50	900

Для исследования макро- и микроструктуры изготавливались продольные полированные металлографические шлифы. Травление шлифов образцов сплава Ti – 6Al – 4V проводили в растворе Кролла. Микроструктуру изучали на оптическом микроскопе ZEISS AXIOVERT 40 MAT. Микротвердость по Виккерсу измерялась на боковой поверхности образцов сплава Ti–6Al–4V с использованием твердомера ПМТ-3 при нагрузке 100 г в течение 10 с.

Результаты. Микрофотографии сварного соединения в образце проката свидетельствуют о наличии трех различных областей: зона плавления (FZ), которая подвергается плавлению и повторному затвердеванию, зона термического влияния (HAZ), которая подвергается тепловому циклу в твердом состоянии, и основной металл (BM), который в значительной степени не зависит от процесса сварки (рис. 1а). Микроструктура проката BM (рис. 1б), представлена в основном равноосными зернами α -Ti размером 5-10 мкм, по границам которых наблюдается β -фаза Ti. Частично встречается мелкодисперсная первичная α -фаза, вытянутая в направлении BM, и показана на рисунке 1б. FZ почти полностью состоит из игольчатой α' -фазы в предшествующих столбчатых β -зернах, что является характеристикой бездиффузионного превращения β -фазы при быстром охлаждении. Зерна вытянутой морфологии размером от 50-150 мкм (рис. 4г). Происходит эпитаксиальный рост β -зерен в шве в направлении теплоотвода. HAZ можно охарактеризовать, как переходную область микроструктуры по отношению к FZ с участками рекристаллизации, где микроструктура зависит от локальной температуры начала мартенситного превращения у основного материала (M_c). На микрофотографии, представленной на рисунке 4г видно, что зона HAZ представлена укрупненной структурой основного металла и редкими игольчатыми α' зернами, похожими на таковые в FZ, но с отличающейся морфологией.

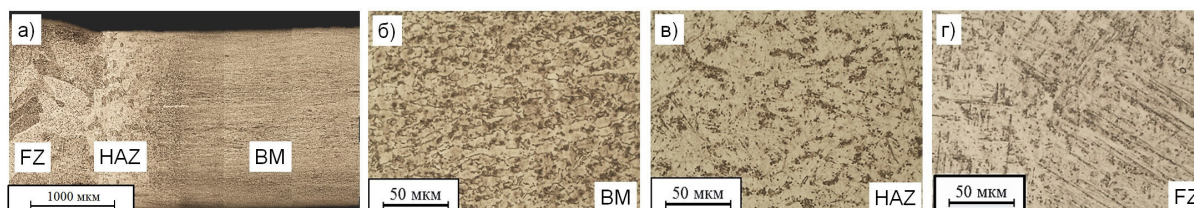


Рис. 1. Микроструктуры образца проката из титанового сплава Ti-6Al-4V. Металлографическое изображение поперечного шлифа – а, микроизображения зон BM, HAZ, FZ – б, в, г

Аналогично происходит образование трех зон в образце EBF³ (FZ, HAZ и BM), что наблюдается на рисунке 2а. Однако микроструктура основного материала BM представлена первичными столбчатыми зернами β-фазы, внутри которых наблюдается структура мартенсита (рис. 2б). FZ сварного шва EBF³ образцов наблюдается формирование первичных столбчатых зерен β-фазы, состоящих из тонкой игольчатой α'-фазы (рис. 2г). Только размер столбчатых зерен заметно больше (рис. 1а и 2а). В ходе плавления в образце EBF³ поперечные размеры столбчатых β-зерен в шве наследуют размеры первичных β-зерен в основном материале, что связано зарождением β-зерен из расплава на β-зернах исходного сплава. HAZ представлена столбчатыми β-зернами основного материала, рис. 2а. Внутри данных зерен структура также состоит из игольчатой α'-фазы промежуточной морфологии (рис. 2 в).

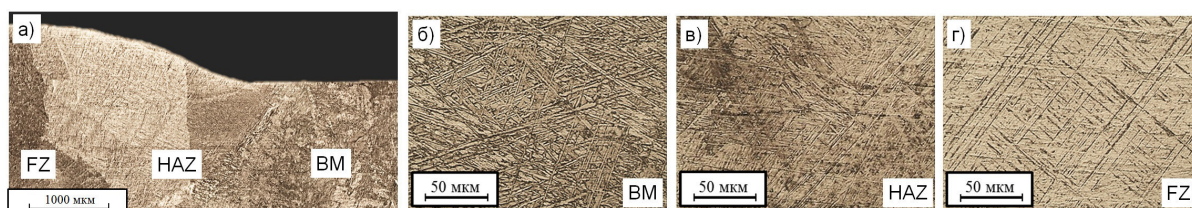


Рис. 2. Микроструктуры образца EBF³ из титанового сплава Ti-6Al-4V. Металлографическое изображение поперечного шлифа – а, микроизображения зон BM, HAZ, FZ – б, в, г

Результаты измерения микротвердости образцов показывают, что в исходном прокате микротвердость составляет около 4,5 ГПа, а в сварном шве – около 5 ГПа. В образцах EBF³ твердость основного металла 4,1 ГПа, а в сварном шве 5 ГПа и 5,75 ГПа. Значения твердостей в зоне термического влияния постепенно снижаются от значений в зоне плавления (FZ) к основному металлу (BM) для всех образцов.

Заключение. В результате проведенных исследований электронно-лучевой сварки было выявлено формирование трех сварных зон (FZ, HAZ, BM) в изделиях из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных как традиционными, так и аддитивными методами. В зоне плавления (FZ) исследованных образцов образуются первичные β-зерна, состоящие из мартенситной структуры. Характер и размеры зерен, образующихся в зоне термического влияния образцов проката и EBF³, различаются, в виду закономерностей наследования структуры основного материала. Показано повышение твердости в зоне плавления, что связано с образованием более тонкой мартенситной структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rafi H. K., Karthik N. V., Gong H., Starr T. L., Stucker B. E. Microstructures and Mechanical Properties of Ti6Al4V Parts Fabricated by Selective Laser Melting and Electron Beam Melting // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2013. – V. 22., № 12. – P. 3872–3883.
2. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
3. Panin A., Kazachenok M., Perevalova O., Martynov S., Panina A., Sklyarova E. Continuous Electron Beam Post-Treatment of EBF³-Fabricated Ti-6Al-4V Parts // Metals. – 2019. – V. 9., № 6. – P. 1-16.