

УДК 621.789:620.18

**Модификация микроструктуры в процессе ультразвуковой ударной электроискровой
обработки сварных швов образцов ВТ6, полученных прокаткой и 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

**Modification of microstructure in the ultrasonic impact electrospark treatment of welded
joints of wrought and electron-beam additive manufactured VT6 alloys**A.A. Iakhin¹, S.A. Martynov²

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

¹Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050²Institute 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 microstructure and microhardness in the ultrasonic impact electrospark treatment welded joints of wrought and electron beam additive manufactured (EBAM) VT6 titanium alloy. Electron beam welding was carried out by double movement of the electron beam across the wrought and EBAM VT6 samples. The results of metallographic studies have demonstrated that the sizes of the welded joints modification zones of EBAM VT6 samples in the treatment was higher than that of the wrought VT6 samples under the same conditions. The influence of the electrical resistance of the wrought and EBAM VT6 alloy on the microstructure and modification zones sizes of the welded joint has been shown.*

Key words: *electron beam additive manufacture; titanium alloys; VT6 (Ti-6Al-4V/Ti64); electron beam welding; electrical resistance.*

Введение

Титановые сплавы, в частности ВТ6 (аналог Ti6Al4V, Ti64), славятся своим исключительным сочетанием свойств и широко используются в различных областях техники и медицины. Одним из методов сварки титановых сплавов является электронно-лучевая сварка, обладающая высокой энергоэффективностью, превосходной точностью и качеством сварных соединений. Однако сварочный процесс как традиционно, так и аддитивно полученных титановых изделий приводит к снижению прочности в зоне сварки, требуя дополнительной постобработки для восстановления или придания эксплуатационных свойств материалу. Существуют различные методы модификации поверхности, включая механические, физические и химические технологии и их комбинации. Применение ударной электроискровой обработки представляет собой многообещающий путь для улучшения структуры и свойств сварных соединений [1]. Несмотря на широкие возможности регулировки режимов обработки, влияние исходной микроструктуры и электрических свойств на качество модификации поверхностного слоя остается критически важным.

Экспериментальная часть

Исследования проводили на образцах из титанового сплава ВТ6, полученных традиционным и аддитивным методами, соответственно прокаткой и ЭЛАТ (электронно-лучевая аддитивная технология). Размеры заготовок проката составляли 2х30х80 мм, заготовок ЭЛАТ –

22x30x80 мм. Прокатанные образцы были в состоянии поставки, ГОСТ 22178-76. Заготовки ЭЛАТ были изготовлены на установке электронно-лучевой аддитивной технологии, разработанной в ИФПМ СО РАН, (Томск, Россия). Химический состав проволоки соответствовал стандартам ASTM B348. Электроэрозионным методом из прокатанных и 3D-напечатанных заготовок вырезались пластины 2x22x80 мм, которые разделяли пополам. Электронно-лучевая сварка проводилась на установке ЭЛУ-9 по следующим параметрам: 1 проход – оплавление кромок ($I = 20$ мА, $v = 10$ мм/с, эллипс 1 x 1), 2 проход – сварка ($I = 20$ мА, $v = 10$ мм/с, эллипс 10 x 10). Ультразвуковая ударная электроискровая обработка проводилась на установке, которая оснащена бойком из сплава WC-6%Co. Обрабатываемый образец и боек были подключены к отрицательному и положительному полюсу конденсатора, соответственно. Задавались следующие параметры обработки: выходное напряжение 30–60 В, амплитуда импульсного тока 850 А. Фотографии микроструктуры образцов были получены при помощи оптического микроскопа AXIOVERT-200MAT. Электрическое сопротивление образцов измерялось с методом четырехточечного зонда на экспериментальной установке при стандартных условиях. Микротвердость измеряли на твердомере ПМТ-3 при нагрузке 50 грамм в течение 10 с.

Результаты

После электронно-лучевой сварки как прокатанных, так и ЭЛАТ образцов ВТ6 в сварных швах формируются столбчатые первичные β зерна, внутри которых наблюдаются пластины α/α' -фазы (рис. 1, а, г, б, д). Размеры первичных β зерен ЭЛАТ образцов ВТ6 заметно больше (рис. 1, а, г), что объясняется наследованием размеров более крупных первичных β зерен исходной структуры, в сравнении с малыми размерами α зерен исходного металла прокатанного образца ВТ6.

Согласно рис. 1, в, е ультразвуковая ударная электроискровая обработка сопровождается пластической деформацией и интенсивным нагревом металла, а также локальным расплавлением металла на поверхности образца в зоне сварного шва. Последствия характеризуются сформированной градиентной микроструктурой вблизи поверхности, которая представляет собой покрытие толщиной от 10 до 20 мкм и зону термического влияния.

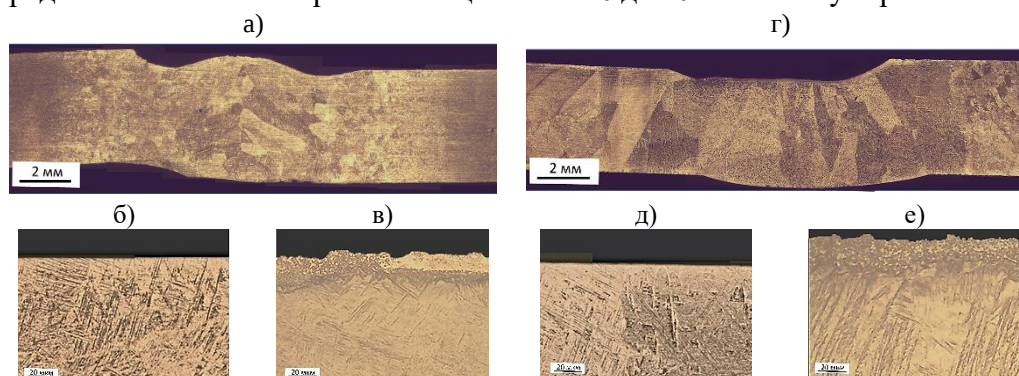


Рис. 1. Внешний вид сварных соединений, полученных электронно-лучевой сваркой – прокатанного образца ВТ6 (а), ЭЛАТ образца ВТ6 (в). Изображение микроструктуры сварных швов – до УЗТ образца прокатанного ВТ6 (б), ЭЛАТ образца ВТ6 (д) и после УЗТ обработки (в) и (е), соответственно

Существенное повышение микротвердости до 16,5–17,5 ГПа вблизи поверхности всех исследуемых образцов ВТ6 является подтверждением переноса твердосплавного материала бойка WC-6%Co в поверхностный слой с формированием покрытия в зоне сварного шва (рис. 2, а). Данный факт объясняется чрезмерным нагревом поверхности в ходе генерации искр. Двигаясь вглубь шва изменяется микроструктура, а именно размеры пластин (рис. 1, б, в и д, е), что определяет зону термического влияния. Примечательно, что в данной зоне микротвердость снижается не линейно. Такой характер снижения обусловлен критическим

нагревом подповерхностного слоя с небольшим отпускком деформированной структуры под воздействием ультразвука. Рассматривая более глубокие слои сварного шва, небольшое повышение микротвердости связано с недостаточно высокими температурами нагрева, сохраняя деформированное состояние материала, сформированное под действием ультразвука. Наконец, дальше 150–200 мкм от поверхности сварного шва не наблюдаются явные признаки влияния ультразвуковой ударной электроискровой обработки на микроструктуру и микротвердость.

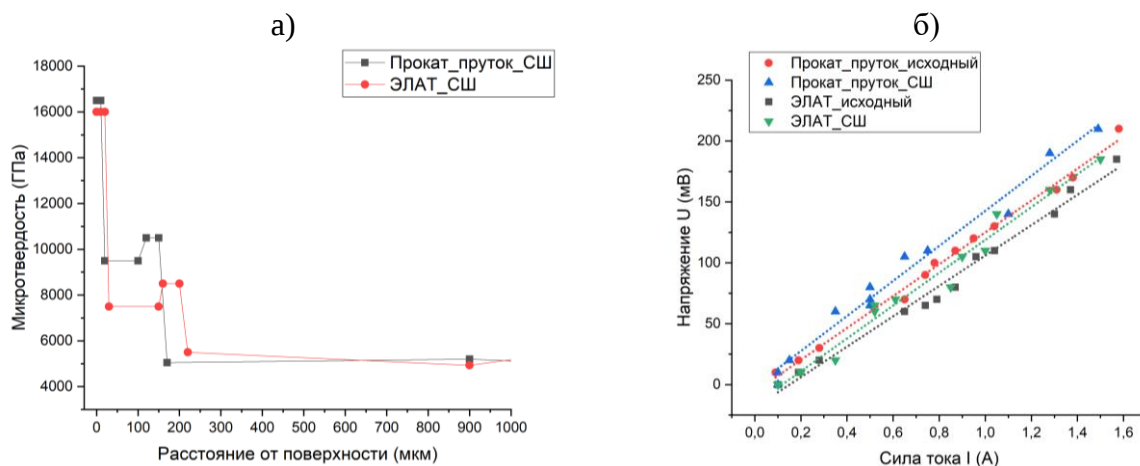


Рис. 2. График распределения микротвердости от поверхности до корня шва после УЗТ обработки (а). График зависимости вольтамперной характеристики для исходных образцов ВТ6 и их сварных швов (б)

После ультразвуковой ударной электроискровой обработки ЭЛАТ образцы ВТ6 характеризуются повышенной толщиной покрытия на 5–15 мкм, и зоной термического влияния на 30–50 мкм, в сравнении с размерами аналогичных зон прокатанных образцов ВТ6. Более низкое электросопротивление ЭЛАТ образцов ВТ6 и их швов (рис. 2, б) обуславливает более мощные искры и высокие температуры нагрева поверхности материала, в сравнении с прокатанными образцами ВТ6 при одних и тех же параметрах обработки.

Заключение

После ультразвуковой ударной электроискровой обработки сварные швы ЭЛАТ образцов ВТ6, полученные электронно-лучевой сваркой, характеризуются повышенными размерами покрытия и зоны термического влияния, в отличие от сварных швов, прокатанных образцов ВТ6. Более низкое электросопротивление ЭЛАТ образцов ВТ6 интенсифицирует генерацию искр, тем самым повышая локальную температуру поверхности, в сравнении с прокатанными образцами ВТ6 при одинаковых режимах обработки. В то же время перенос материала бойка в поверхностный слой и формирование покрытия повышает микротвердость до 16,5–17 ГПа.

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. Zhang L.C., Chen L.Y., Wang L. Surface modification of titanium and titanium alloys: technologies, developments, and future interests // Advanced Engineering Materials. – 2019. – Vol. 22, № 5. – P. 1901258. (DOI:10.1002/adem.201901258)