УДК 621.789:620.18

РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ АДДИТИВНО ПОЛУЧЕННЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ ТИТАНОГО СПЛАВА ВТ6 И ИХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

<u>А.А. Яхин^{1.2}</u>

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: <u>albertodebertto@mail.ru</u>

X-RAY STRUCTURAL ANALYSIS OF ADDITIVE MANUFACTURED TI-6AL-4V TITANIUM ALLOY PARTS AND THEIR WELDED JOINTS

A.A. Iakhin^{1.2}

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

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

²Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Russia, Tomsk, Akademicheskii ave., 2/4, 634055 E-mail: <u>albertodebertto@mail.ru</u>

Abstract. The structure of Ti-6Al-4V alloy parts obtained by Selective laser melting and their electron-beam welded joints has been investigated using X-ray analysis. In this study, the Bead on Plate welding imitated of welded joints and produced a three welding zones such as the fusion zone, the heat affected zone and the base metal in the additive manufactured material. The results of the research show that the structure of as-built metal and their welded joint consists of $\alpha/\alpha'/\beta$ -phases. The microdistortions of the crystal structure of the welded joint are lower, and the volume fraction of β -phase is higher than the as-built material.

Введение. Аддитивные технологии обладают рядом преимуществ в сравнении с традиционными технологиями такими, как снижение времени производства изделий и широкие возможности получения деталей сложной формы [1]. Современные технологии 3D-печати металлами связаны с определенными трудностями получения крупногабаритных изделий в виду недостаточности объемов рабочих камер и структурных дефектов, возникающих в ходе процесса печати [2]. Одним из основных решений перечисленных проблем является получение неразъемных соединений 3D-напечатанных деталей, в частности, зарекомендованным в авиастроении методом, электронно-лучевой сваркой (ЭЛС). Одним из широко применяемых в авиастроении является титановый сплав ВТ6 (аналог Ti-6Al-4V). Наличие остаточной β-фазы в сплаве ВТ6 характеризует процессы перераспределения легирующих элементов, а также вносит вклад в конечные механические характеристики. Структура шва после ЭЛС традиционно полученных титановых сплавов достаточно хорошо исследована, и известно, что в шве происходит снижение объемной доли β-фазы относительно исходного материала. [3]. Однако аддитивно полученые титановые изделия характеризуются заведомо низким содержанием β-фазы, что вызывает вопросы с формированием структуры

ХХ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК»

их сварных соединений. Таким образом, целью данной работы является проведение рентгеноструктурного анализа аддитивно полученных титановых образцов и их сварных соединений.

Экспериментальная часть. В данной работе проводились исследования образцов титанового сплава Ti-6Al-4V (аналог BT6), полученных методом SLM (Selective laser melting – селективное лазерное сплавление). Заготовки с размером 10x10x80 мм были получены на установке EOSINT M280 (EOS Electro Optical Systems, Мюнхен, Германия). В ходе процесса SLM использовался порошок титанового сплава Ti-6Al-4V, с размером частиц от 50 до 100 мкм канадской компании AP & C. Из заготовок методом электроэрозионной резки вырезались образцы 2x10x10 мм. Воспроизведение электронно-лучевой сварки методом переплавления валика (термин из ГОСТ Р 58904-2020/ISO/TR 25901-1:2016) на поверхности образцов осуществлялось на установке ЭЛУ-9 при ускоряющем напряжении 30 кВ, скорости переплавления валика 900 мм/мин и силе тока пучка 20 мА. Фотографии микроструктуры образцов были получены при помощи оптического микроскопа AXIOVERT-200MAT. Фазовый состав исходной структуры и зон валика были определены на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000. Рентгеноструктурный анализ (PCA) осуществлялся с Cu K_α-излучением по симметричному подходу Брэгта-Брентано в диапазоне углов от 30° до 90° [4]. Упругие остаточные макронапряжения и микродеформация кристаллической решетки α-Ti оценивалась по уширению пиков в сравнении с эталоном BT6 (в состоянии поставки) экстраполяционным методом [4].

Результаты. При переплавления валика в исследуемых образцах ВТ6 формируется 3 сварные зоны (рис.1): зона сварного шва (СШ), которая подвергается расплавлению и последующему затвердеванию, зона термического влияния (ЗТВ), которая нагревается и охлаждается в ходе теплового цикла в твердом состоянии и основной металл (ОМ), который не подвергается воздействию сварки. Каждая из перечисленных зон характеризуется своей термической историей и определенным фазовым составом.



Рис. 1. Металлографическое изображение поперечного шлифа исследуемого образца ВТ6: СШ-зона шва, ЗТВ – зона термического влияния, ОМ – основной металл

Результаты рентгеноструктурного анализа показывают наличие пиков α- и β-фаз титана для зон сварного шва и основного металла исследуемых образцов. Согласно рис. 2, рентгенограмма зоны ОМ соответствует исключительно напряженному материалу. Проведенный расчет остаточных напряжений в данной зоне показал растягивающие напряжения до 2х ГПа. Отмечено пониженное содержание β-фазы (0,5 % об.), что характерно для изделий из титанового сплава BT6 (Ti-6Al-4V), полученных аддитивными методами, и объясняется высокой скоростью охлаждения расплавленного материала в процессе 3D- печати [5].

Рентгенограмма сварного шва на рис. 2 характеризуется заужением рефлексов, объясняемое дефектностью игольчатой микроструктуры, но существенно меньшей относительно основного металла. Также изменение соотношения интенсивностей пиков фазы α-Ті свидетельствует о текстуре вдоль

ХХ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК»

направления α-фазы (101). Наряду с этим, на рентгенограмме наблюдается повышение интенсивности пика (101) в связи с релаксацией микроструктуры в ходе термического воздействия, что согласуется с более низкими растягивающими напряжениями (0,3 ГПа) в сравнении растягивающими напряжениями в зоне ОМ. Предполагается, что перераспределение легирующих элементов в ходе охлаждения расплава после ЭЛС происходило быстрее, следовательно, скорость охлаждения меньше, чем в процессе SLM, о чем свидетельствует сдвиг пиков рефлексов сварного соединения вправо относительно рентгенограммы основного материала. Объемная доля β-фазы в зоне СШ повышается относительно зоны ОМ до 2,7 % об., что также подтверждает повышенную скорость перераспределения легирующих элементов.



Рис. 2. Рентгенограмма основного металла и сварного шва исследуемого образца ВТ6

Заключение. В результате проведенного рентгеноструктурного анализа основной металл аддитивно полученного образца ВТ6 характеризуется крайне напряженным состоянием и низкой объемной долей βфазы. После электронно-лучевой сварки сварной шов обладает повышенной объемной долей β-фазы, преобладающей текстурой вдоль направления α-фазы (101) и более низкими релаксирующими растягивающими напряжениями в сравнении с основным металлом.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Sames W.J., List F.A., Pannala S., Dehoff R.R., Babu S.S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing // Int. Mater. Rev. 2016. V. 61. P. 315-360. Doi: 10.1080/09506608.2015.1116649
- 2. Phutela C., Aboulkhair N.T. The Effects of Feature Sizes in Selectively Laser Melted Ti-6Al-4V Parts on the Validity of Optimised Process Parameters // J. Metals. 2020. V13, 117. P. 1-14. Doi:10.3390/ma13010117
- 3. Сидоров В.П., Мельзитдинова А.В. Электронно-лучевая сварка. Технологические особенности и оборудование. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2013. 96 с.
- Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М: Металлургия, 1970. – 328с.
- 5. Sinyakova E.A., Panin S.V., Teresov A.D. Surface modification of selective laser melted Ti-6Al-4V by ultrasonic impact treatment and electron beam irradiation // AIP Conf. Proc. 2019. № 2167. P. 020336.