

УДК 621.74

**Получение образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V
методом проволочной электронно-лучевой аддитивной технологии**

К.Д. Камелина

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н., А.В. Панин
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050
E-mail: kdk11@tpu.ru

**Obtaining samples from titanium Ti-6Al-4V
alloy by wire-feed electron beam additive manufacturing**

K.D. Kamelina

Scientific supervisor: Prof., Dr., A.V. Panin
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050
E-mail: kdk11@tpu.ru

Abstract. *The microstructure and phase composition of 3D-printed titanium Ti-6Al-4V alloy sample obtained by wire-feed electron beam additive manufacturing were studied using optical microscopy and X-ray diffraction analysis. Investigations were conducted in zones that were located at different distances from the substrate. It was found that the sizes of primary β -grains and phase composition change with increasing distance from the substrate.*

Key words: *additive technologies, EBAM, titanium Ti-6Al-4V alloy, microstructure.*

Введение

В последние годы большое распространение получил метод аддитивных технологий (АТ), позволяющий изготавливать изделия из металлов, - электронно-лучевое сплавление. В качестве сырья для производства образцов методами АТ перспективными материалами могут быть титан и его сплавы, в частности сплав Ti-6Al-4V. Однако образцы, полученные АТ из сплавов титана, по своим свойствам отличаются от образцов, полученных традиционной обработкой металлов [1]. Поскольку структура образцов зависит от параметров печати, то существует необходимость в подборе параметров печати, обеспечивающих минимальный размер зерна и максимальную прочность. Целью работы является получение образца из титанового сплава Ti-6Al-4V и исследование его микроструктуры, элементного и фазового состава, а также его твердости.

Экспериментальная часть

3D-напечатанный брусок в форме параллелепипеда с размерами 18 мм × 12 мм × 60 мм был получен плавлением проволоки Ti-6Al-4V в вакууме $1,3 \times 10^{-3}$ Па электронной пушкой с плазменным катодом при ускоряющем напряжении 30 кВ на подложке из нержавеющей стали 12X18H10T, ток пучка составлял 46 мА, скорость печати – 19,5 мм/с. 3D-напечатанный брусок Ti-6Al-4V был разрезан вдоль его передней грани (рис. 1).

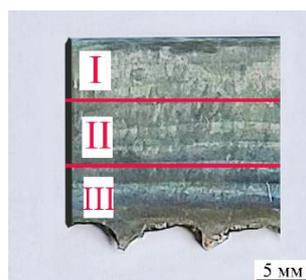


Рис. 1. Зоны исследования 3D-напечатанного образца Ti-6Al-4V

Результаты

Микроструктура образца состоит из первичных зерен β -фазы, размеры которых растут с увеличением расстояния от подложки (рис. 2). В нижней и средней зонах (III и II) их размеры варьируются в пределах 70-150 мкм и 130-200 мкм соответственно (рис. 2, б и в). В верхней зоне продольные размеры зерен варьируются в пределах 200-460 мкм (рис. 2, а).

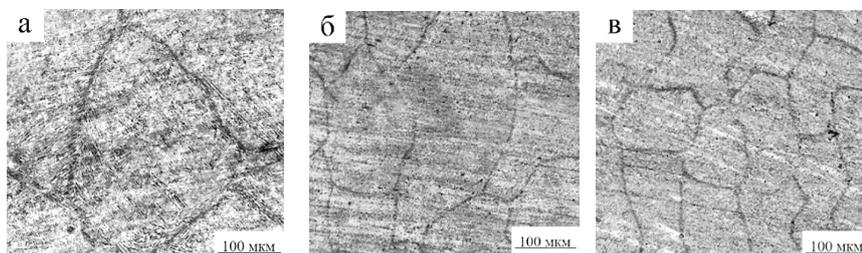


Рис. 2. Оптические изображения зеренной структуры 3D-напечатанного образца Ti-6Al-4V в зонах I (а), II (б) и III (в)

Внутри первичных зерен β -фазы в образце наблюдаются пластины α -Ti, поперечные размеры которых независимо от расстояния от подложки достигают 2 мкм, а продольные –

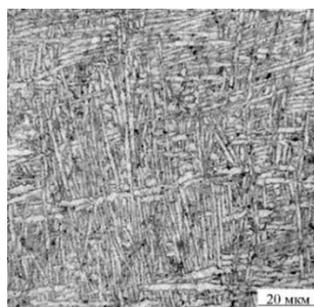


Рис. 3. Оптическое изображение пластин α -фазы в зоне II 3D-напечатанного образца Ti-6Al-4V

Формирование неравноосных зерен β -фазы наблюдается по причине неравномерного отвода тепла в слоях бруска при его печати. Теплопроводность материала подложки выше, чем титана, из которого состоит образец. Отвод тепла в нижних слоях интенсивнее, чем в верхних. Остывание верхних слоев изделия происходит медленно, что приводит к образованию крупных зерен [2].

Рентгенофлуоресцентный анализ образца показал однородность элементного состава в средней (II) и верхней (I) его зонах, а в нижней зоне (III) выявлено повышенное содержание железа и жюгих элементов нержавеющей стали (табл. 1).

Таблица 1

Результаты рентгенофлуоресцентного анализа

Область	Обнаруженные фазы	Содержание фаз, объем. %	Элементный состав, масс. %					Твердость, $\pm 0,1$ ГПа
			Al	V	Fe	Ti	Ni	
I	α -Ti	95,5	6,7	4,7	0,1	88,5	-	2,0
	β -Ti	4,5						
II	α -Ti	94,5	6,7	4,6	0,1	88,6	-	4,0
	β -Ti	5,5						
III	α -Ti	81,9	6,5	4,3	6,1	81,2	0,9	5,9
	β -Ti	17,7						
	Ni	0,4						

Методом рентгенофазового анализа выявлена неоднородность фазового состава образца по высоте: верхняя и средняя его зоны характеризуются наличием α фазы с гексагональной плотноупакованной решеткой и β фазы с объемно-центрированной кубической решеткой, а в нижней зоне помимо этих фаз наблюдается присутствие фазы Ni, что соответствует данным элементного анализа (табл. 1). Наличие фазы Ni в нижней зоне обусловлено диффузией материала подложки в образец в процессе печати. Повышенное содержание объемной доли β -Ti в нижней зоне связано с наличием элементов нержавеющей стали, которые являются β -стабилизаторами. Кроме того, согласно данным табл. 1, с увеличением расстояния от подложки твердость образца уменьшается от 5,9 до 2,0 ГПа, что обусловлено в основном соответствующими изменениями в микроструктуре.

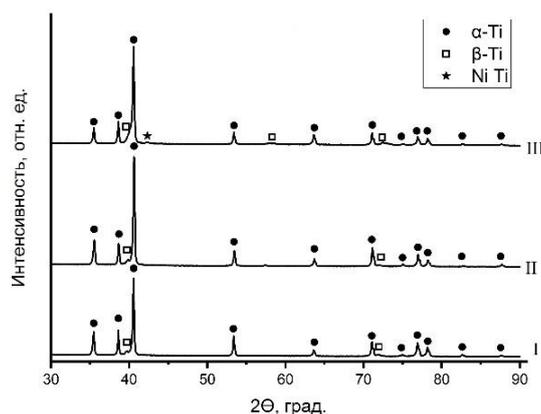


Рис. 4. Дифрактограммы 3D-напечатанного образца Ti-6Al-4V в зонах I, II и III

Заключение

На основе проделанной работы сделаны следующие выводы:

- Установлено, что микроструктура 3D-напечатанного образца титанового сплава Ti-6Al-4V изменяется с увеличением расстояния от подложки: размеры зерен увеличиваются от 70-150 мкм в нижней зоне до 200-460 мкм в верхней зоне. Причиной этого является разная скорость остывания верхних и нижних слоев бруска в процессе 3D-печати.
- Выявлен факт проникновения элементов нержавеющей стали в образец в месте контакта образца с подложкой, что обусловлено испарением и диффузией материала подложки в образец.
- Показано, что по мере приближения к подложке в образце увеличивается содержание β -фазы титана. Это связано с наличием в нижней зоне элементов нержавеющей стали, которые являются β -стабилизаторами.
- Установлено, что твердость образца уменьшается с увеличением расстояния от подложки, что связано с различным размером первичных β -зерен и пластин α фазы, объемной долей остаточной β -фазы и содержанием легирующих элементов в твердом растворе на основе α -Ti и β -Ti.

Список литературы

1. Петрикова Е.А., Тересов А.Д., Иванов Ю.Ф. Сравнительный анализ структуры и свойств сплава ВТ6, полученного традиционными методами и послойным селективным спеканием порошка // Взаимодействие излучений с твёрдым телом. – 2017. – С. 269–271.
2. Первалова О.Б., Панин А.В., Казаченок М.С. Влияние охлаждения подложки на микроструктуру и фазовый состав изделий из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных методами аддитивных технологий // Журнал технической физики. – 2020. – № 3. – С. 410–418.