

УДК 621.791.722

**МИКРОСТРУКТУРА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT14,  
ПОЛУЧЕННЫХ ПРОКАТКОЙ И МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПРОВОЛОЧНОЙ  
АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

Т.А. Лобова<sup>1</sup>, С.А. Мартынов<sup>2</sup>

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. А.В. Панин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

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

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4, 634055

E-mail: tal4@tpu.ru

**MICROSTRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF VT-14 TITANIUM ALLOY PARTS  
PRODUCED BY ROLLING AND WIRE-FEED ELECTRON BEAM ADDITIVE MANUFACTURING**

T.A. Lobova<sup>1</sup>, S.A. Martynov<sup>2</sup>

Scientific Supervisor: Prof., Dr. A.V. Panin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

<sup>2</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,

Russia, Tomsk, pr. Akademicheskii, 2/4, 634055

E-mail: tal4@tpu.ru

**Abstract.** *The microstructure and phase composition of titanium alloy VT14 parts produced by rolling and wire-feed electron beam additive manufacturing are compared using optical, scanning and transmission electron microscopy, backscattered electron diffraction, and X-ray diffraction analysis. The content of alloying elements in the  $\alpha$  and  $\beta$  phases of titanium alloys was studied by EDX analysis. The results showed that samples of 3D-printed titanium alloy VT14 are characterized by larger prior  $\beta$  grains, smaller sizes of  $\alpha$  phase plates, a lower volume fraction of residual  $\beta$  phase, and higher microhardness.*

**Введение.** В настоящее время наблюдается большой интерес к проведению фундаментальных, поисковых и прикладных исследований в области аддитивного производства металлических деталей и элементов конструкций [1-3]. Аддитивные производственные технологии позволяют сократить длительность производственного цикла и создавать элементы конструкций сложной формы при одновременном снижении себестоимости продукции. Целью работы является сравнительный анализ микроструктуры и фазового состава прокатанных и 3D-напечатанных образцов титанового сплава VT14, который широко применяется в авиастроении в качестве изделий сложной пространственной конфигурации, деталей двигателя, в машиностроении для изготовления тормозных дисков и шаровых баллонов для ракет.

**Экспериментальная часть.** Образцы титанового сплава VT14, находящегося в прокатанном состоянии, представляли собой прямоугольные пластины с размерами 10 мм × 10 мм × 2 мм, вырезанные методом электроискровой резки из прутка диаметром 40 мм. Химический состав сплава VT14,

виміряний з допомогою портативного спектрометра X-met 8000: Ti – 89,31 %. Al – 5,73 %, V – 1,61 %, Mo – 3,23 %, Fe – 0,037 %, Zr – 0,007 %.

3D-напечатанні заготовки VT14 з розмірами 25 мм × 25 мм × 70 мм були отримані методом проволочної електронно-лучової аддитивної технології (англ. Electron Beam Additive Manufacturing, сокращенно EBAM). Плавлення проволоки VT14 здійснювалось в вакуумі  $1,3 \times 10^{-3}$  Па електронною пучкою з плазменним катодом при прискорюючому напругу 30 кВ. Ток пучки варіювався в діапазоні 21 – 24 мА. Подача проволоки здійснювалась зі швидкістю 2 м/хв під кутом  $35^\circ$  к поверхні підложки. Стратегія 3D-печати образців заключалась в переміщенні опорної плити відносно електронного луча по меандрувній траєкторії з зеркально наплавленими шарами зі швидкістю 4 мм/с.

Мікроструктуру прокатаних образців VT14 і отриманих методом електронно-лучової проволочної аддитивної технології, вивчали з допомогою оптичного мікроскопа Zeiss Axiovert 40 MAT, скануючого електронного мікроскопа Arco 8 (ЦКП Нанотех ІФПМ СО РАН), а також методом дифракції обернено розсіяних електронів (EBSD) з використанням приставки Oxford Instruments Nordlys. Для металлографічних досліджень шліфувана і полірована поверхня титанових образців підлягала попередньому травленню в реагенті Кролла (2% HF, 2% HNO<sub>3</sub>, і 96% H<sub>2</sub>O). Дослідження елементного складу образців проводили методом мікрорентгеноспектрального аналізу з використанням спектрометра INCA X-Act. Рентгеноструктурний аналіз 3D-напечатаних заготовок VT14 проводили на дифрактометрі Shimadzu XRD-6000 (ЦКП НОІЦ НМНТ ТПУ, підтриманий проектом Міністерства науки Росії № 075-15-2021-710).

**Результати.** Мікроструктура прокатаного зразка зі сплаву VT14 складається з первинних неорієнтованих β зерен (рис. 1,а). Середні подовжні і поперечні розміри первинних β зерен становлять 180 і 120 мкм. Всередині первинних β зерен спостерігаються пластини α фази, середні поперечні розміри яких не перевищують 2 мкм (рис. 2,а). Між пластинами α фази спостерігається залишкова β фаза, яка має пластинчасту або глобулярну морфологію. Розміри зерен залишкової β фази варіюються в межах від 0,5 до 2 мкм (рис. 2,а). Згідно даним мікроенергодисперсійного аналізу, вміст ванадію і молибдену всередині прошарків β фази не перевищує 5,3 і 18,9 мас. %.

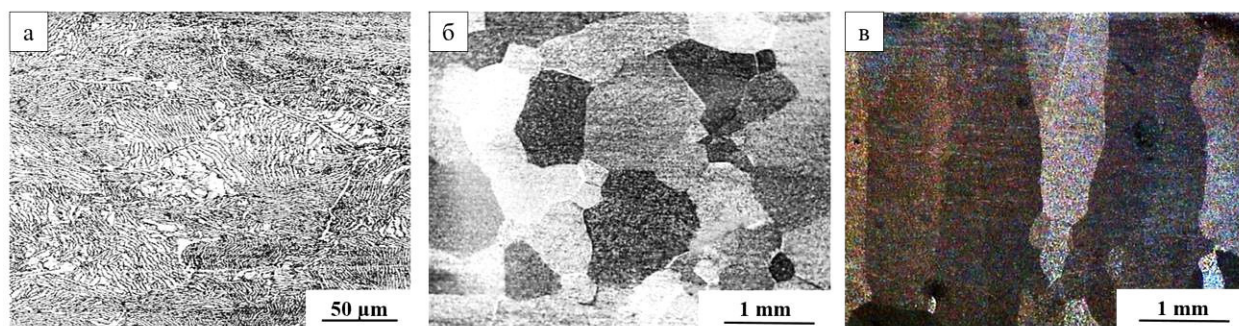


Рис. 1. Оптичні зображення мікроструктури прокатаного (а) і 3D-напечатанного зразка VT14 (б, в). Зображення отримані в подовжній (б) і поперечній площині (в) відносно напрямку 3D печатки

Мікроструктура 3D-напечатаних образців VT14 складається з стовпчатих первинних β зерен, орієнтованих вздовж напрямку росту виробу (рис. 1, б, в). Середній поперечний розмір стовпчатих

первичных  $\beta$  зерен составляет 1 мм. Внутри первичных  $\beta$  зерен располагаются разориентированные пластины  $\alpha$ -Ti (рис. 2, б). Поперечный размер пластин  $\alpha$  фазы варьируются в пределах от 0,3 до 1,5 мкм. По границам пластин  $\alpha$  фазы выделяются мелкие глобулярные зерна остаточной  $\beta$  фазы со средним размером 0,8 мкм. Согласно результатам рентгеноструктурного анализа, объемная доля  $\beta$  фазы в прокатанных и 3D-напечатанных образцах составляет 12,2 и 10,5 % соответственно.

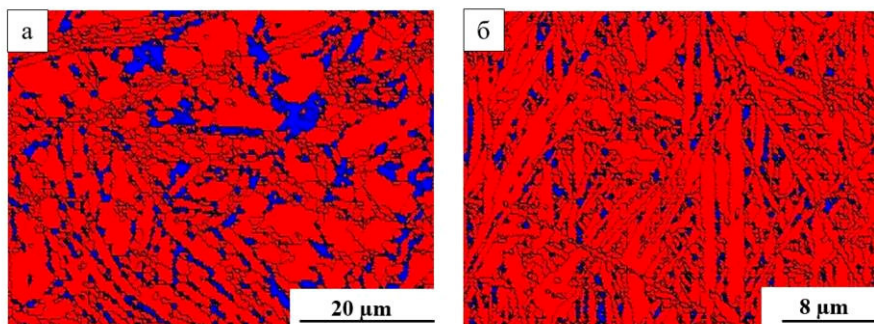


Рис. 2. EBSD-карты распределения фаз  $\alpha$ -Ti (красный цвет) и  $\beta$ -Ti (синий цвет) в прокатанном (а) и 3D-напечатанном образцах VT14 (б)

Меньший поперечный размер пластин  $\alpha$  фазы обуславливает более высокое значение микротвердости 3D-напечатанного образца VT14 (3900 МПа) по сравнению с прокатным образцом (3600 МПа).

**Заключение.** В результате проведенных исследований подобраны оптимальные режимы получения беспористых заготовок из титанового сплава VT14 методом электронно-лучевой проволоочной аддитивной технологии. Показано, что в отличие от прокатанных образцов VT14, состоящих из первичных неравноосных  $\beta$  зерен с продольными и поперечными размерами 180 и 120 мкм соответственно, в 3D-напечатанных образцах VT14 формируются столбчатые первичные  $\beta$  зерна, поперечные размеры которых достигают 1 мм. Внутри первичных  $\beta$  зерен наблюдаются пластины  $\alpha$  фазы, причем в 3D-напечатанных образцах поперечные размеры пластин в 2 раза меньше, чем в прокатанных образцах. Кроме того, 3D-напечатанные образцы характеризуются меньшей объемной долей и размерами остаточной  $\beta$  фазы. Значения микротвердости прокатного и 3D-напечатанного образцов VT14 составляют 3600 и 3900 МПа соответственно.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 21-19-00795).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. Additive Manufacturing of Metals// Acta Mater. – 2016. – V. 117. – P. 371–392.
2. 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.
3. Lee J. Y., An J., Chua C. K. Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials // Applied Materials Today. – 2017. – V. 7. – P.120–133.