

УДК 621.791.722

**ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИЗДЕЛИЙ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT14, ПОЛУЧЕННЫХ
ПРОКАТКОЙ И МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПРОВОЛОЧНОЙ АДДИТИВНОЙ
ТЕХНОЛОГИИ**Т.А. Лобова^{1,2}Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. А.В. Панин²¹Национальный 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: tal4@tpu.ru**HEAT TREATMENT OF HOT-ROLLED AND ELECTRON BEAM ADDITIVE
MANUFACTURED VT14 TITANIUM ALLOY**T.A. Lobova^{1,2}Scientific Supervisor: Prof., Dr. A.V. Panin²¹Tomsk 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: tal4@tpu.ru

Abstract. The influence of the initial state of samples of titanium alloy VT14 produced by rolling and electron-beam additive technology on the change in their microstructure and mechanical properties during heat treatment was studied using optical microscopy and X-ray diffraction analysis. The results showed that during heat treatment the prior β grains size did not change, but the interlayers of residual β phase in the rolled products decreased, and in the 3D-printed samples the size of the α plates changed. During heat treatment, the β -phase content decreased in all samples and the ω -phase completely disappeared.

Введение. Сплав VT14 (4Al-3Mo-1V) относится к классу термообрабатываемых $\alpha+\beta$ титановых сплавов, и является наиболее предпочтительным конструкционным материалом для аэрокосмических применений. Электронно-лучевая проволочная аддитивная технология может расширить применение титанового сплава VT14, поскольку данная технология обладает низкой себестоимостью, высокой скоростью производства и возможностью изготовления деталей сложной формы, по сравнению с традиционными методами. Поскольку микроструктура и фазовый состав изделий из титановых сплавов, полученных традиционными методами литья и штамповки, и аддитивным методом, имеют существенные отличия, то и результат термообработки образцов, полученных разными методами, может иметь значительную разницу [1, 2]. Целью данной работы является исследование влияния исходного состояния образцов титанового сплава VT14, полученных методами прокатки или электронно-лучевой аддитивной технологии, на изменение их микроструктуры и механических свойств в процессе термической обработки.

Экспериментальная часть. Образцы титанового сплава VT14, находящегося в прокатанном состоянии, представляли собой прямоугольные пластины с размерами 20 мм × 50 мм × 2 мм, вырезанные методом электроискровой резки из прутка диаметром 40 мм. 3D-напечатанные заготовки из титанового сплава VT14 были получены методом проволочной электронно-лучевой аддитивной технологии (англ. Electron Beam

Additive Manufacturing, сокр. ЕВАМ). Образец виде стенки с размерами 100 мм × 10 мм × 60 мм был получен плавлением проволоки ВТ14 в вакууме $1,3 \times 10^{-3}$ Па электронной пушкой с плазменным катодом при ускоряющем напряжении 30 кВ, ток пучка при наплавлении первого слоя составлял 58 мА, последующие слои наплавливались при токе 36 мА. Скорость печати составляла 200 мм/мин.

Термическая обработка образцов титанового сплава ВТ14, изготовленных разными методами, заключалась в закалке от 900°C (время выдержки 1 час) с последующем отпуском при 500°C в течение 12 ч.

Для металлографических исследований шлифованная и полированная поверхность титановых образцов подвергалась предварительному травлению в реагенте Кролла (2% HF, 2% HNO₃, и 96% H₂O). Микроструктуру образцов из титанового сплава ВТ14, полученных методом электронно-лучевой проволоочной аддитивной технологии и прокаткой, изучали с помощью оптического микроскопа Zeiss Axiovert 40 MAT. Микротвердость измеряли на твердомере ПМТ-3. Анализ фазового состава исследуемых образцов выполняли методом рентгенофазового анализа (РФА) на основании анализа дифрактограмм, полученных с помощью дифрактометра Shimadzu XRD-7000.

Результаты. Микроструктура прокатанных образцов сплава ВТ14 состоит из первичных неравноосных β зерен, средние продольные и поперечные размеры которых составляют 180 и 120 мкм соответственно (рис.1, а). Внутри первичных β зерен наблюдаются пластины α фазы, поперечные размеры которых не превышают 2 мкм. Закалка и последующий отпуск не влияют на размеры первичных β зерен, однако приводят к уменьшению толщины прослоек остаточной β фазы (рис. 1, б, в).

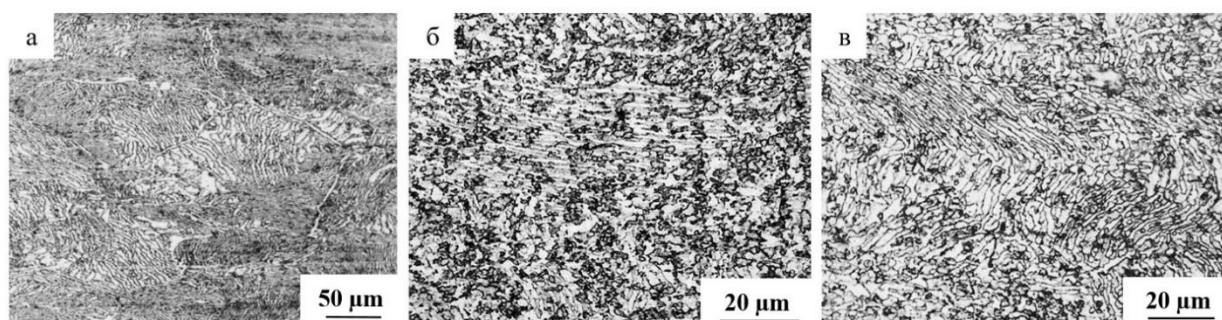


Рис. 1. Оптические изображения микроструктуры структуры прокатанных образцов титанового сплава ВТ14 до термической обработки (а), после закалки от 900°C (б) и закалки от 900°C с последующем отпуском при 500°C в течение 12 ч (в)

Микроструктура 3D-напечатанных образцов состоит из столбчатых первичных β зерен, ориентированных вдоль направления роста изделия, внутри первичных β зерен располагаются разориентированные ламели α-Ti (рис. 2, а). Средние продольные и поперечные размеры α-ламелей в образце до термической обработки составляют 17 мкм и 2,5 мкм. Термическая обработка по-прежнему не влияет на зеренную структуру 3D-напечатанных образцов титанового сплава ВТ14, однако после закалки средние продольные размеры α-ламелей увеличились до 20 мкм, а их поперечные размеры не изменились (рис.2, б). В процессе отпуска, напротив продольные размеры α-ламелей уменьшились до 12 мкм, а их поперечные размеры остались без изменений (рис.2, в).

Рентгеноструктурный анализ показал, что объемная доля β фазы в прокатном образце ВТ14 до термической обработки составляет 8,5 %, α фазы – 2 %. После закалки объемная доля β фазы уменьшается до 2,5 %, а после закалки и последующем отпуске ее величина не превышает 1,3 %, α фаза после термообработок не наблюдается. В 3D-напечатанных образцах ВТ14 до термической обработки объемная доля β фазы

составляет 7,6 %, а ω фазы – 2,5 %. В образце, который подвергался закалки от 900 °C, выделилась фаза α'' – 40 %, а объемные доли β фазы составляет 1,5 %, ω не наблюдалось. После закалки от 900 °C с последующем отпуском при 500 °C в течение 12 ч объемные доли α'' фазы – 16 %, β – 2,2 %, ω отсутствовала.

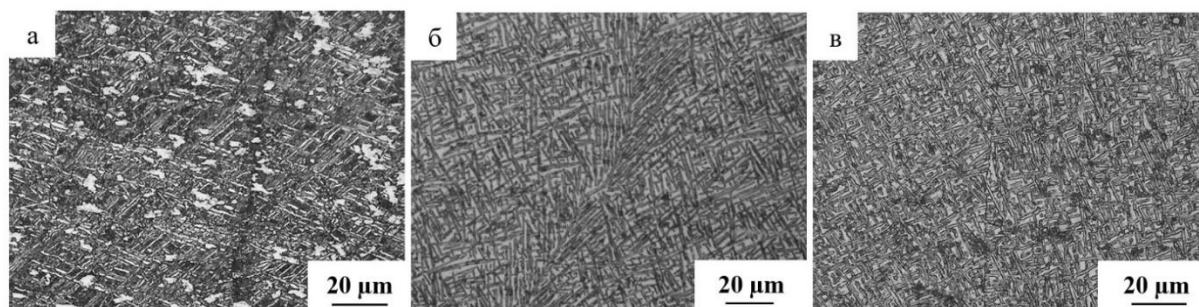


Рис.2. Оптические изображения микроструктуры 3D-напечатанных образцов титанового сплава BT14 до термической обработки (а), после закалки от 900 °C (б) и закалки от 900 °C с последующем отпуском при 500 °C в течение 12 ч (в)

Значения микротвердости прокатанного образца BT14 до термической обработки составило 3400 МПа, а после закалки с последующим отпуском – 3200 МПа. Микротвердость образца BT14, изготовленного методом электронно-лучевой аддитивной технологии, составляла 3100 МПа, после термообработок значение микротвердости повысилось до 3700 МПа.

Заключение. В работе показано, что закалка от 900 °C (выдержка – 1 ч) и последующий отпуск при 500 °C в течение 12 ч не влияет на зеренную структуру прокатанных и 3D-напечатанных образцов, но изменяет их внутризеренную структуру. В прокатанных образцах BT14 после закалки и отпуска размеры пластин α фазы не изменяются, но уменьшаются поперечные размеры прослоек остаточной β фазы. В 3D-напечатанных образцах BT14 продольные размеры α -ламелей увеличиваются после закалки и уменьшаются после отпуска. Основной фазой в исходных прокатанных и 3D-напечатанных образцах BT14 является α фаза, вторыми фазами являются β и ω фазы. Независимо от метода получения образцов BT14 содержание β -фазы в результате их термообработки уменьшается до ~2,5 %, при этом ω фаза полностью растворяется. Кроме того, в 3D напечатанных образцах после закалки образуется α'' фаза (40 %), однако при последующем отпуске, вследствие развития $\alpha'' \rightarrow \alpha + \beta$ превращения, ее содержание уменьшается до 16 %. После термической обработки 3D-напечатанный образец демонстрирует значение микротвердости 3700 МПа, что на 19 % выше, чем у исходного. В случае прокатанного образца, микротвердость после термообработки снизилась на 6 %.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0010. Исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» ИФПМ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fan Zhechaoa, Feng Hongwei. Study on selective laser melting and heat treatment of Ti-6Al-4V alloy // Results in Physics – 2018. – V. 10. – P. 660-664.
2. Lothar W. Meyer., Lutz Krüger., Kristin Sommer., Thorsten Halle., Matthias Hockauf. Dynamic strength and failure behavior of titanium alloy Ti-6Al-4V for a variation of heat treatments // Mech Time-Depend Mater. – 2008. – V. 12. – P. 237-247.