

**СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ОБРАЗЦЕ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti-6Al-4V, ПОЛУЧЕННОМ ПРОВОЛОЧНОЙ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ, ПРИ ГАЗОФАЗНОМ НАВОДОРАЖИВАНИИ***К. Д. КАМЕЛИНА*

Томский политехнический университет

E-mail: [kdk11@tpu.ru](mailto:kdk11@tpu.ru)

В последнее время большое распространение получил метод аддитивных технологий (АТ), позволяющий производить изделия из металлов, – электронно-лучевое сплавление. В качестве сырья для производства образцов методами АТ перспективными материалами могут быть сплавы титана, в частности сплав Ti-6Al-4V. Стоит вопрос об использовании изделий, полученных АТ, в средах, насыщенных водородом. Как известно, взаимодействие титана с водородом приводит к охрупчиванию материала. Исследования на эту тему уже проводились с традиционно полученными образцами. Образцы, полученные АТ из сплавов титана, по своим свойствам отличаются от образцов, полученных традиционно [1]. Предполагается, что изделия из Ti-6Al-4V, полученные АТ, под воздействием водорода также будут обладать иными свойствами. Целью работы является исследование структурно-фазовых превращений в образце из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученном проволочной аддитивной технологией, при газофазном наводороживании.

Брусек из сплава Ti-6Al-4V с размерами 18 мм × 12 мм × 60 мм был получен электронно-лучевым плавлением проволоки диаметром 1,5 мм в вакууме  $1,3 \times 10^{-3}$  Па электронной пушкой с плазменным катодом при ускоряющем напряжении 30 кВ, ток пучка составлял 46 мА. Подача проволоки осуществлялась со скоростью 2 м/мин под углом 35° к поверхности подложки из 16X18H10T. Методом электроискровой резки из бруска был вырезан образец с размерами 5 мм × 5 мм × 0,1 мм.

Наводороживание образца Ti-6Al-4V происходило при температуре 450 °С и длилось 96 минут. Использовалась высокотемпературная камера рентгеновского дифрактометра Shimadzu XRD 7000S.

Массовую долю водорода в образце после высокотемпературного насыщения измеряли методом экстракции водорода при нагреве в потоке инертного газа-носителя на установке LECO RHEN-602.

Образец исследован до и после газофазного наводороживания.

Микроструктура образца Ti-6Al-4V до наводороживания состоит из первичных  $\beta$  зёрен неравноосной формы. Поперечные их размеры варьируются в пределах 120–175 мкм, продольные – 200–400 мкм (рисунок 1, а). Внутри первичных зерен  $\beta$ -фазы наблюдаются пластины  $\alpha$ -Ti, поперечные размеры которых достигают 2 мкм, а продольные – 35 мкм (рисунок 1, б). По границам пластин наблюдаются прослойки остаточной  $\beta$ -фазы титана.

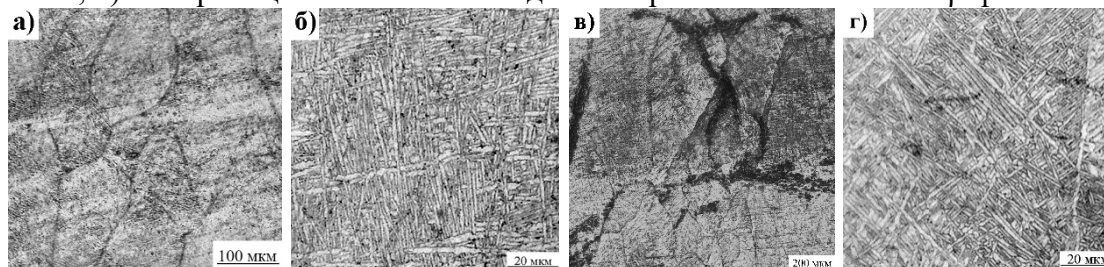


Рисунок 1. Оптические изображения зеренной структуры образца титанового сплава Ti-6Al-4V до (а, б) и после наводороживания при температуре 450 °С (в, г)

Зёренная структура образца после наводороживания стала более неоднородной, размеры первичных  $\beta$  зёрен увеличились до 230–300 мкм в поперечном направлении и 330–570 мкм в

продольном (рисунок 1, в). Размеры пластин  $\alpha$ -Ti при этом, исходя из металлографии, изменились незначительно (рисунок 1, г).

Элементный анализ состава аддитивно полученного образца из сплава Ti-6Al-4V не выявил наличия в нём примесей соответствует ГОСТу (таблица 1). Необходимо отметить, что присутствие небольшого содержания железа допускается в сплаве Ti-6Al-4V [2].

Таблица 1 – Фазовый и химический состав, а также твёрдость образца Ti-6Al-4V

| Образец   | Обнаруженные фазы | Содержание фаз, объем. % | Элементный состав, масс. % |     |     |      | HV  |
|-----------|-------------------|--------------------------|----------------------------|-----|-----|------|-----|
|           |                   |                          | Al                         | V   | Fe  | Ti   |     |
| Ti-6Al-4V | $\alpha$ -Ti      | 94,5                     | 6,7                        | 4,6 | 0,1 | 88,6 | 408 |
|           | $\beta$ -Ti       | 5,5                      |                            |     |     |      |     |

Методом рентгеноструктурного анализа обнаружено, что образец титанового сплава Ti-6Al-4V до наводороживания характеризуется выраженной текстурой в направлении (101) (рисунок 2). Объёмная доля остаточной  $\beta$ -фазы титана составляет 5,5 %.

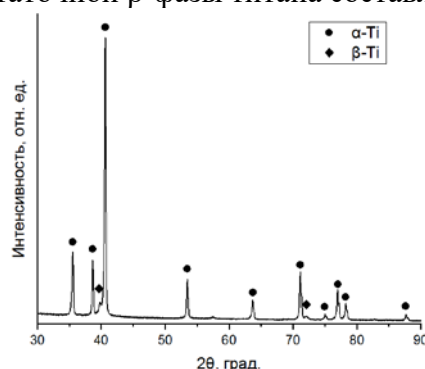


Рисунок 2. Дифрактограмма исходного образца Ti-6Al-4V

При наводороживании, после 28-й минуты насыщения водородом начались фазовые переходы, приводящие к снижению интенсивности пиков  $\alpha$ -Ti. Наблюдался пик переходной фазы  $\alpha''$ -Ti (30–37 мин); после 37 минут наводороживания, так как водород является  $\beta$ -стабилизатором, полностью исчезли пики  $\alpha$ -Ti и увеличилась интенсивность пика (110)  $\beta$ -Ti. На 52-й минуте насыщения водородом количество водорода в сплаве превысило предел растворимости, что привело к образованию химического соединения TiH<sub>2</sub> (рисунок 3).

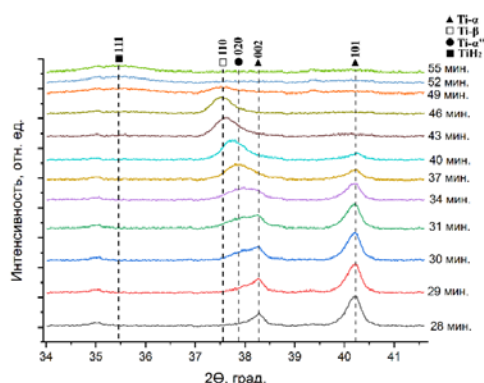


Рисунок 3. Дифрактограммы образца Ti-6Al-4V, измеренные в процессе наводороживания при температуре 450 °C

Массовая доля водорода в образце после высокотемпературного насыщения составила 3,4 %.

Проведенные с помощью просвечивающей электронной микроскопии исследования выявили наличие в образце, подвергнутом наводороживанию при температуре 450 °С в течение 96 минут, более мелких кристаллитов предположительно  $\alpha$  фазы (рисунок 4, а). На рисунке 4 (б, в) представлены темнопольные изображения  $\alpha$ -фазы титана с ГПУ решёткой с межплоскостным расстоянием 2,55 Å (100) и  $\beta$ -фазы титана с ОЦК решёткой с межплоскостным расстоянием 0,87 Å (123). Кроме того, обнаружено присутствие гидрида титана в насыщенном водородом образце. Межплоскостное расстояние структуры гидрида титана, темнопольное изображение которого представлено на рисунке 4, г составляет 1,58 Å (220).

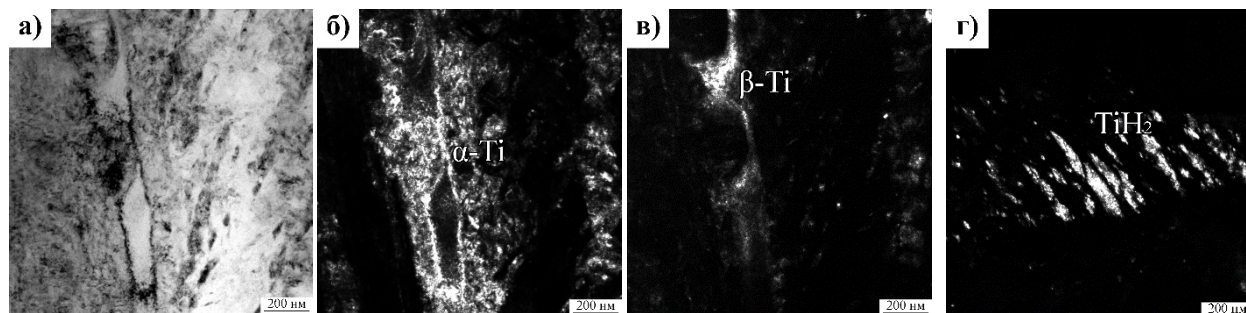


Рисунок 4. ПЭМ-изображения в светлом поле (а) и тёмном поле (б-г) образца Ti-6Al-4V, подвергнутого наводороживанию при температуре 450 °С. Изображения в тёмном поле были сняты в рефлексах 100  $\alpha$ -Ti (б), 123  $\beta$ -Ti (в) и 200 TiH<sub>2</sub> (г)

Твёрдость образца до наводороживания составляла  $4,0 \pm 0,1$  ГПа, после наводороживания стала достигать 1203 HV, при этом образец стал более хрупким, что может быть обусловлено водородным охрупчиванием [3].

На основе проделанной работы сделаны следующие выводы:

1. Выявлено, что насыщение водородом образца Ti-6Al-4V, полученного проволоочной аддитивной технологией, привело к увеличению первичных зёрен  $\beta$ -фазы титана. Их поперечные размеры при этом увеличились от 120–175 мкм до 230–300 мкм, а продольные – от 200–400 мкм до 330–570 мкм.
2. Выявлены закономерности фазовых превращений, развивающихся в образце Ti-6Al-4V, полученном проволоочной аддитивной технологией, в процессе насыщения водородом при температуре 450 °С. Показано, что после 28 минут наводороживания наблюдается постепенное исчезновение фазы  $\alpha$ -Ti, появление промежуточной фазы  $\alpha''$ -Ti, и последующее образование фазы  $\beta$ -Ti. Наводороживание в течение 52 минут приводит к исчезновению  $\alpha$ -Ti,  $\alpha''$ -Ti и  $\beta$ -Ti фазы и возникновению гидрида титана.
3. Методом просвечивающей электронной микроскопии подтверждено наличие гидрида титана в образце Ti-6Al-4V, полученном проволоочной аддитивной технологией, после наводороживания.
4. Показано, что вследствие наводороживания в образце существенно повышается твёрдость (от 408 HV до 1203 HV). При этом образец, насыщенный водородом, очень хрупок.

#### Список литературы

1. Казанцева Н.В., Крахмалев П.В., Ядройцева И.А., Ядройцев И.А. Лазерная аддитивная 3D-печать титановых сплавов: современное состояние, проблемы, тенденции // Физика металлов и металловедение. – 2021. – № 1. – С. 8–30.
2. ГОСТ 19807-91 Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки: Межгосударственный стандарт: дата введения 2012-07-01 // Комитет стандартизации и метрологии. Изд. Официальное.
3. Колачев Б.А. Водородная хрупкость цветных металлов. – М.: Металлургия, 1996. – 256 с.