

**ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА ФОРМИРОВАНИЕ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ В
ТИТАНОВОМ СПЛАВЕ VT16**

А.О. Хованова

Научный руководитель: д.ф.-м.н. Г.П. Грабовецкая

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

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

E-mail: anastasia_khovanova@mail.ru

**INFLUENCE OF HYDROGEN ON FORMATION OF THE ULTRA-GRAIN STRUCTURE IN THE
TITANIUM ALLOY VT16**

A.O. Khovanova

Scientific Supervisor: Dr. G.P. Grabovetskaya

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

E-mail: anastasia_khovanova@mail.ru

***Abstract.** The electron microscopic methods were used to study the formation of an ultrafine-grained structure in VT16 titanium alloy by pressing using reversible doping with hydrogen. It is shown that the presence in the solid solution of 0.15 wt. % of hydrogen makes it possible to form an ultrafine-grained structure in VT16 alloy with a greater dispersion of elements and increased strength characteristics compared to an unalloyed hydrogen alloy.*

Введение. В настоящее время наиболее перспективными конструкционными материалами являются титановые сплавы. Вследствие высокой коррозионной стойкости, биосовместимости и низкой плотности широко эти сплавы используются в морском судостроении, аэрокосмической промышленности, а также в медицине. Однако титановые сплавы имеют недостаточную прочность, поэтому вопрос об улучшении прочностных характеристик особенно важен. Одним из методов повышения механических свойств поликристаллов является измельчение зерен до нано – и/или субмикронного размера. Эффективным способом получения материала с такой структурой является интенсивная пластическая деформация. Титановые сплавы являются труднодеформируемыми материалами, поэтому для измельчения их структуры используют метод, сочетающий обратимое легирование водородом и горячую пластическую деформацию, что позволяет снизить энергетические затраты. Целью работы является изучение влияния водорода на формирование ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры и механических свойств в сплаве системы Ti-Al-V-Mo.

Экспериментальная часть. Для исследования был выбран двухфазный ($\alpha+\beta$) титановой сплав системы Ti-Al-V-Mo (далее сплав VT16). Сплав содержит значительное количество β – стабилизаторов (Mo-4,9 и V-4,5 мас.%), поэтому объемная доля β -фазы в этом сплаве достигает 22%. Для формирования УМЗ состояния в исследуемом сплаве использовали два метода: метод прессования со сменой оси деформации и постепенным понижением температуры и комбинированный метод, сочетающий предварительное наводороживание и горячее прессование. Наводороживание цилиндрических заготовок сплава VT16 диаметром 20 мм и высотой 35 мм до 0,15 мас.% проводили в аппарате типа Сиверста при температуре 873 К и давлении 1 атм (далее сплав VT16-0,15H). Длительность насыщения в зависимости

от требуемой концентрации водорода составляла от 6 до 30 часов. Прессование заготовок осуществляли на воздухе в изотермических условиях при температурах 923 и 823К. Прессование состояло из 2 циклов, каждый из которых состоял из трех сжатий в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Деформация заготовки за одно сжатие составляла 50%.

Для металлографических исследований исследуемых сплавов в исходном состоянии применялся оптический микроскоп OlympusGX71, оснащенный высокоразрешающей цифровой камерой. Для исследования УМЗ структуры сплава был использован просвечивающий электронный микроскоп марки JEM-2100. Для исследования структуры были приготовлены фольги методом механического шлифования и последующей электролитической полировки в охлажденном электролите (состав: 80% ледяной уксусной кислоты и 20% хлорной кислоты). Размеры структурных элементов определяли стандартным методом секущей по соответствующим изображениям микроструктуры.

Испытания на растяжение проводили при комнатной температуре в установке ПВ-3012М с автоматической записью кривой растяжения в координатах нагрузка-время. Для исследования механических свойств были использованы образцы в виде двойной лопатки. Поверхность образцов перед проведением испытаний подвергали механической шлифовке и последующей электролитической полировки. Начальной скоростью растяжения составляла $6,9 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Результаты. Металлографические исследования микроструктуры образца показали, что в исходном состоянии сплав ВТ16 имеет крупнозернистую (КЗ) структуру, содержащую области α и β фаз с размером ~ 500 мкм. Наводораживание до 0,15 мас.% не изменяет структуру сплава.

После прессования со сменой оси деформации при температурах 823 К и 923 К в сплавах ВТ16 и ВТ16-0,15Н формируется двухфазная ($\alpha+\beta$) УМЗ зеренно-субзеренная структура. Типичное электронно-микроскопическое изображение структуры УМЗ сплавов ВТ16 и ВТ16-0,15Н представлено на рис. 1. На светлопольном изображении УМЗ структуры (рис. 1, а) виден сложный деформационный контраст, не позволяющий различить элементы структуры. На электроннограммах такой структуры (рис. 1, а) наблюдаются дифракционные кольца, образованные рефлексамми от отдельных зерен. На темнопольном изображении (рис.1, б) достаточно хорошо видны отдельные элементы структуры. Средний размер элементов структуры сплава ВТ16 составляет $\sim 0,45$ мкм, сплава ВТ16-0,15Н ~ 026 мкм.

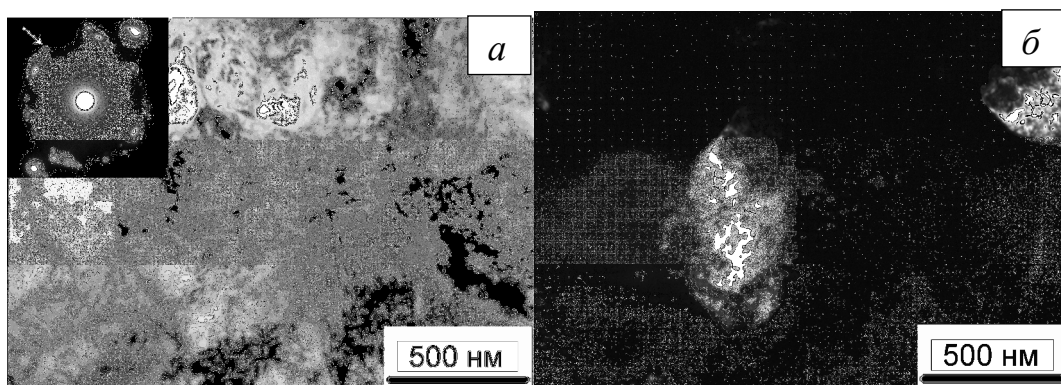


Рис. 1. Типичное электронно-микроскопическое изображение микроструктуры сплава ВТ16, а – светлопольное изображение; б – темнопольное изображение

Водород является примесью, приводящей к охрупчиванию титановых сплавов. Поэтому после прессования водород был удален из сплава путем отжига при температуре 873К в течение 1 часа. После такого отжига содержание водорода в образцах снизилось до концентрации, соответствующей техническому регламенту (~0,004 мас.%, далее сплав VT16-0,004H). При этом УМЗ структура в сплаве сохранилась (рис. 2).

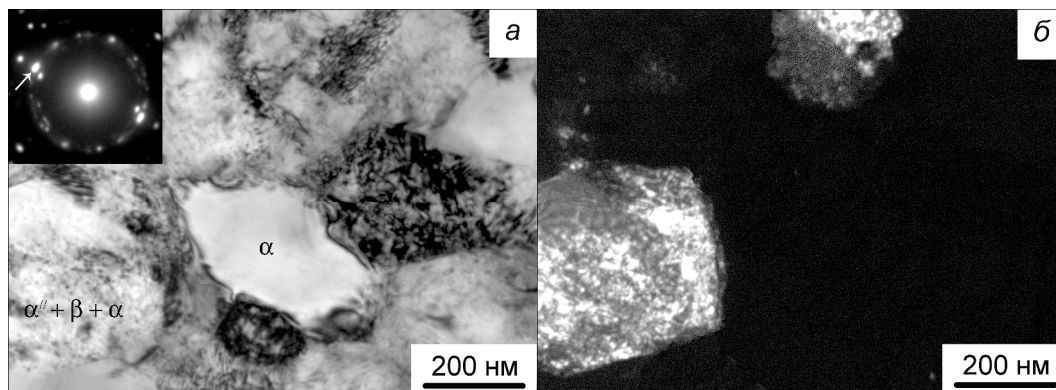


Рис. 2. Типичное электронно-микроскопическое изображение микроструктуры сплава VT16-0,15H, а – светлопольное изображение; б – темнопольное изображение

Средний размер элементов зеренно-субзеренной структуры УМЗ сплава VT16-0,004H, определенный по темнопольному изображению (рис. 2, б), составил $0,25 \pm 0,16$ мкм. В УМЗ структуре сплава VT16-0,004H имеются два типа зерен: зерна, имеющие пластинчатую морфологию, с поперечным размером пластин 5-10 нм, и зерна, свободные от выделений с низкой плотностью дислокаций. При этом доля зерен с пластинчатой структурой составляет ~70%. Зерна свободные от выделений являются зернами α -фазы титана. Зерна с пластинчатой морфологией содержат α , α'' и β фазы титана.

В таблице 1 представлены данные о механических свойствах сплава VT16 в КЗ и УМЗ состоянии с различной концентрацией водорода. Из данных таблицы видно, что формирование УМЗ структуры в сплавах VT16 и VT16-H после 2 циклов прессования приводит к повышению прочностных характеристик. При этом наиболее высокие прочностные характеристики имеет УМЗ сплав VT16-0,004H, полученный с использованием обратимого легирования водородом.

Таблица 1
Механические свойства титановых сплавов VT16 и VT16-H в КЗ и УМЗ состояниях при комнатной температуре

Материал	d, мкм	$\sigma_{0,2} \pm 50$, МПа	$\sigma_B \pm 50$, МПа	$\delta \pm 1$, %
КЗ VT16-0,002H	27	905	987	18
УМЗ VT16-0,002H	0,45	1139	1209	11
УМЗ VT16-0,15H	0,26	1131	1234	14
УМЗ VT16-0,004H	0,25	1197	1286	11

Заключение. Таким образом, проведенные исследования показывают, что предварительное легирование водородом позволяет формировать в сплаве VT16 методом прессования со сменой оси деформации ультрамелкозернистую структуру с большей дисперсностью элементов и повышенными прочностными характеристиками по сравнению с нелегированным водородом сплавом.