

**Оксана Зияровна Пожого<sup>1</sup>, Константин Румянцев<sup>1\*</sup>, Михаил Андреевич Шураков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
Москва, Российская Федерация

\*delorumyantseva@gmail.com

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАВОДОРОЖИВАЮЩЕГО ОТЖИГА НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СТРУКТУРУ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО ТИТАНОВОГО ОРТО-СПЛАВА

Проведён наводороживающий отжиг образцов интерметаллидного титанового орто-сплава ВТИ-4 до концентраций 0,2-0,3 мас.% при температурах 700 °С, 800 °С и 900 °С, а также по ступенчатому режиму. Исследована структура сплава после проведенных режимов и измерена микротвердость. Установлено, что наводороживающий отжиг не влияет на фазовый состав сплава, который остается двухфазным  $\beta+O$ . Однако, более высокие температуры отжига приводят к укрупнению структурных составляющих в 2 – 5 раз и уменьшению его микротвёрдости.

*Ключевые слова:* интерметаллид титана,  $Ti_2AlNb$ , O-фаза, наводороживающий отжиг, структура, фазовый состав, микротвёрдость.

***Oksana Z. Pozhoga, Konstantin Rumyantsev, Mikhail A. Shurakov***

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

## STUDY OF THE INFLUENCE OF HYDROGEN ANNEALING ON THE PHASE COMPOSITION AND STRUCTURE OF INTERMETALLIC TITANIUM ORTHORHOMBIC ALLOY

Hydrogen annealing of samples of the VTI-4 intermetallic titanium orthorhombic alloy is carried out at temperatures of 700 °C, 800 °C and 900 °C and using a stepwise mode, and the achieved hydrogen content equaled 0.2-0.3wt.%. The structure of the alloy after the modes is studied and microhardness is measured. It has been established that hydrogenation annealing does not affect the phase composition of the alloy which remains two-phase  $\beta+O$ . However, an increase in hydrogenation temperature leads to the coarsening of structural components of the alloy by 2–5 times and a decrease in its microhardness.

*Key words:* titanium intermetallic compound,  $Ti_2AlNb$ , O-phase, hydrogenation annealing, structure, phase composition, microhardness.

Одним из приоритетных направлений развития авиационного двигателестроения является разработка новых материалов для теплонагруженных узлов, работающих при температурах 650–700 °С. Особое место в отрасли занимают интерметаллидные титановые сплавы на основе O-фазы ( $Ti_2AlNb$ ), занимающие промежуточное положение между

жаропрочными титановыми сплавами и сталями по значениям удельной прочности, жаропрочности, предела ползучести, вязкости разрушения [1]. Временное легирование водородом призвано снизить сопротивление деформации сплава, облегчить механическую обработку деталей, а также снизить остаточные термические напряжения [2]. Это достижимо благодаря трансформации структуры материала под влиянием водорода. Поэтому изучение влияния температуры и концентрации введенного водорода на формирование структуры орто-сплава является важным этапом на пути разработки промышленной технологии термоводородной обработки.

Объектом исследования служила деформированная заготовка сплава ВТИ-4 на основе О-фазы ( $Ti_2AlNb$ ) следующего химического состава: Ti—10Al—43Nb—0,9Mo—1,0V—1,5Zr—0,13Si (здесь и далее мас.%). Образцы были подвергнуты наводороживающему отжигу в среде молекулярного водорода, полученного разложением порошка гидрида титана, предварительно активировав поверхность образцов выдержкой в вакууме. Насыщение водородом проводилось при температурах 700 °С, 800 °С, 900 °С и ступенчатом режиме с понижением температуры от 900 °С до 800 °С и затем до 700 °С с выдержками при указанных температурах. О завершении насыщения судили по достижении постоянства значения давления водорода в системе. Концентрацию водорода определяли по приросту массы на аналитических весах A&D HR-150AG. Рентгеноструктурный фазовый анализ образцов проводили в фильтрованном  $CuK\alpha$ -излучении на дифрактометре ДРОН-7. Микроструктуру сплава исследовали на оптическом микроскопе AXIO Observer.A1m с последующей обработкой и анализом полученных изображений с помощью программы NEXSYS ImageExpert Pro3. Микротвердость измеряли на твердомере MicroMet 5101 с алмазной пирамидой при нагрузке 0,5 Н и рассчитывали средние значения.

Структура исходного полуфабриката является двухфазной  $\beta+O$ , размер структурных составляющих не превышает 1 мкм (рис. 1, а, рис. 2, а).

Концентрация введенного водорода зависит от температуры наводороживающего отжига и составляет 0,3% при 700 °С, 0,2% при 800 °С. При температуре отжига 900 °С наблюдается небольшой разброс концентраций, обусловленный, по-видимому, неравномерностью поглощения водорода исходным деформированным полуфабрикатом, и средние значения составляют 0,26% и 0,32% Н при одноступенчатом и трехступенчатом режиме соответственно.

Анализ результатов рентгеноструктурного фазового анализа показал, что температура наводороживающего отжига, как и концентрация введенного водорода не влияют на фазовый состав сплава, представленный О- и  $\beta$ -фазами (рис. 2, б, в). При повышении содержания водорода увеличивается параметр решетки  $\beta$ -фазы от 0,327 нм в исходном состоянии и до 0,331 нм для сплава, содержащего 0,3% Н.

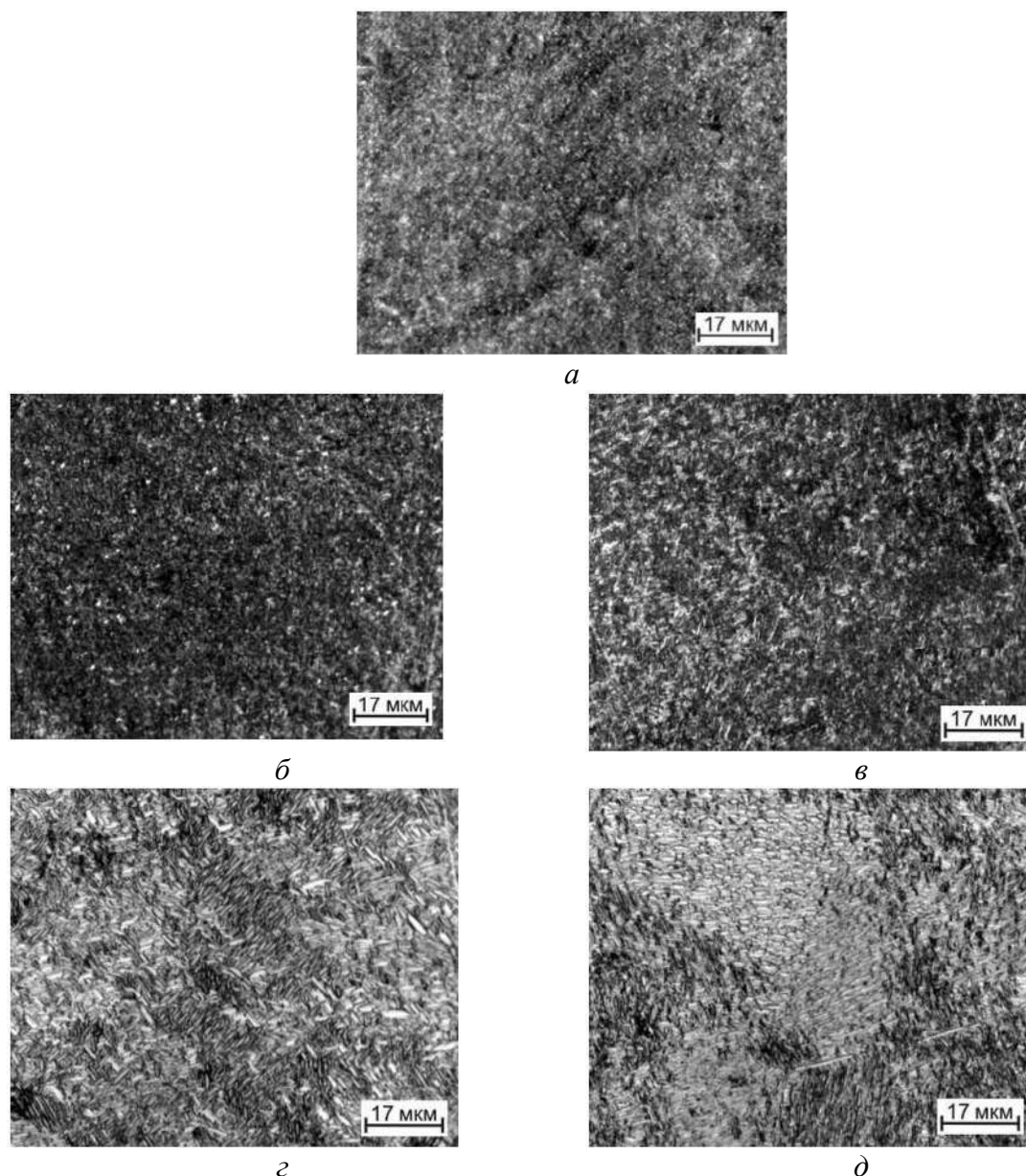
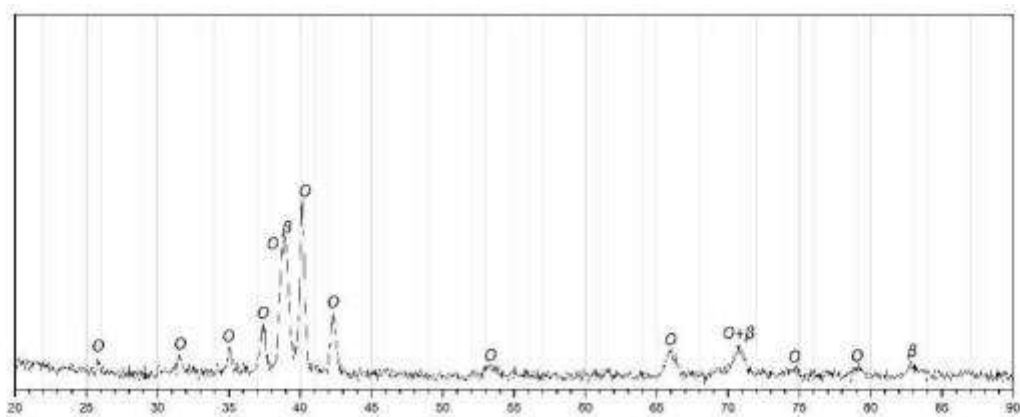
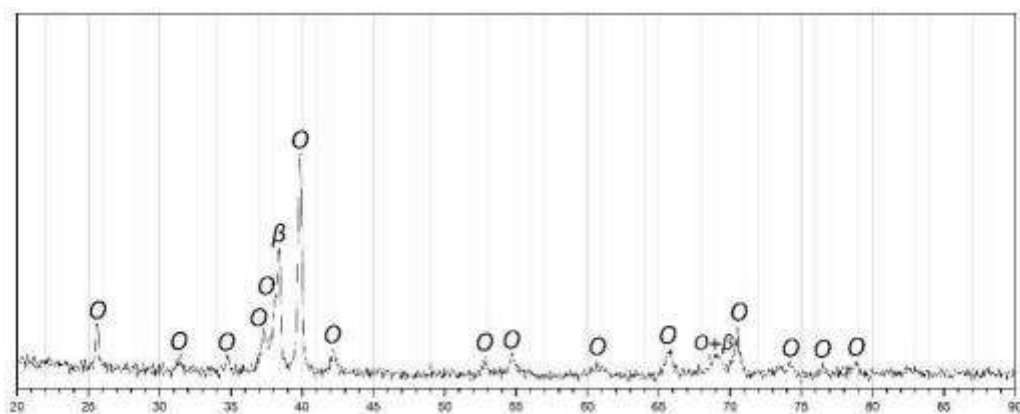


Рис. 1. Микроструктура сплава ВТИ-4: а – в исходном состоянии; после наводороживающего отжига при: б – 700°С до 0,3% Н; в – 800°С до 0,2%Н; г - 900°С, до 0,26% Н; д – ступенчатом отжиге до 0,32%Н

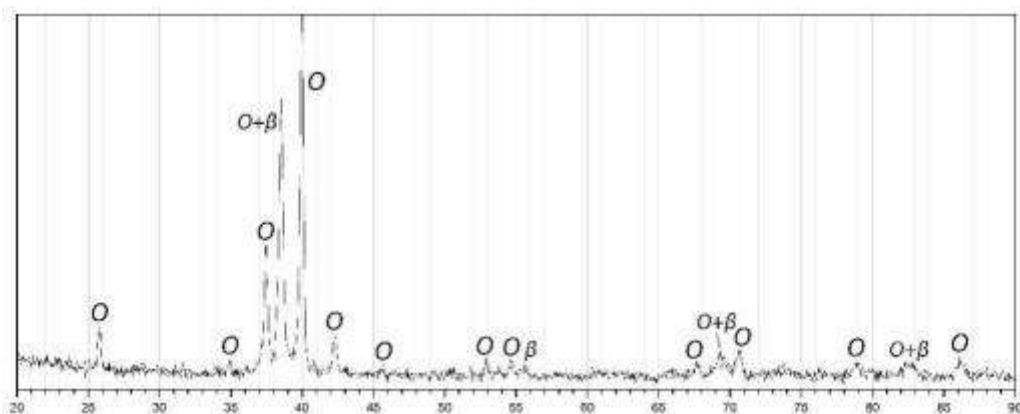
Структура материала после наводороживающего отжига при 700 °С и 800 °С вне зависимости от содержания водорода остается тонкопластинчатой, размер частиц О-фазы не превышает 2 мкм в длину и 0,2 мкм в ширину (рис. 1, б, в). При повышении температуры отжига до 900 °С пластины О-фазы увеличиваются до 4 – 8 мкм в длину и 1–2 мкм в ширину (рис. 2, г, д). Это объясняется тем, что при повышении температуры активизируется  $O \rightarrow \beta$  превращение, количество О-фазы уменьшается, что сопровождается ростом ее частиц в отдельных объемах  $\beta$ -фазы в процессе выдержки при температуре обработки.



*a*



*б*



*в*

Рис. 2. Участки дифрактограмм сплава ВТИ-4: а – в исходном состоянии; после наводороживающего отжига при: б – 700 °С до 0,3% Н; в – 900 °С до 0,26%Н

Структурные изменения в сплаве можно отследить по изменению его микротвёрдости ( $n$ ). После проведения наводороживающего отжига при температуре 700 °С микротвёрдость материала уменьшается с 560 до 510  $HV_{0,05}$ , что связано со уменьшением внутренних напряжений в исходном полуфабрикате. Увеличение температуры наводороживания от 700 °С до 900 °С сопровождается снижением микротвердости на 10 – 12%, что обусловлено уменьшением количества более твёрдой О-фазы и увеличением размера ее пластин [3].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при проведении наводороживающего отжига в интервале температур 700-900 °С фазовый состав сплава остается двухфазным вне зависимости от содержания водорода, а на структуру большое влияние оказывает температура обработки, когда с повышением температуры отжига увеличивается размер пластин О-фазы. Также повышение температуры наводороживания сопровождается снижением микротвердости сплава. Предпочтительны режимы при температурах 700 °С и 800 °С, позволяющие зафиксировать однородную структуру без большой потери твёрдости.

Таблица

Зависимость микротвердости сплава ВТИ-4 от температуры наводороживающего отжига

t, °С	Микротвердость, HV <sub>0,05</sub>
20	560
700	510
800	450
900	460
900 → 800 → 700	450

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-79-10260 с использованием оборудования ресурсного центра коллективного пользования «Авиационно-космические материалы и технологии» МАИ.*

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Демаков С.Л. Сплавы на основе орторомбического интерметаллидтитана Ti<sub>2</sub>AlNb: фазовый состав, легирование, структура, свойства/ С.Л. Демаков [и др.] // *Металлург.* 2023. № 3. С. 42-54.
2. Водородная технология титановых сплавов / А.А. Ильин[и др.]. М.:«МИСиС», 2002. 392 с.
3. Zhang Y., Solution treatment for enhanced hardness in Mo-modifiedTi<sub>2</sub>AlNb-based alloys / Y. Zhang [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds.* 2019. V. 805. P. 1184-1190.

## REFERENCES

1. Demakov S.L. Alloys based on orthorhombic intermetallide Ti<sub>2</sub>AlNb-phase composition, alloying, structure, properties// *Metallurgist.* 2023. Vol. 67, No. 3-4. P. 398-408.
2. Hydrogen Technology of Titanium Alloys / A. A. Il'in [et al.]. Moscow.:«MISiS», 2002. 392 с.
3. Zhang Y., Solution treatment for enhanced hardness in Mo-modifiedTi<sub>2</sub>AlNb-based alloys / Y. Zhang [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds.* 2019. V. 805. P. 1184-1190.