

## Отзыв

официального оппонента на диссертацию Пожого Василия Александровича «ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИДА ТИТАНА ПРИ ТЕРМОВОДОРОДНОЙ ОБРАБОТКЕ», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

### **Актуальность работы.**

Исследование интерметаллидных сплавов на основе системы Ti-Al является одной из самых важных задач современного научного и прикладного металловедения, поскольку эти сплавы рассматриваются как наиболее перспективные для применения в аэрокосмической технике благодаря уникальным значениям удельной жесткости и прочности в сочетании с высокими характеристиками жаропрочности и жаростойкости, при этом рассматривается их применение как в монолитном состоянии, так и в качестве матрицы композитов. Несмотря на достигнутые в этом направлении успехи, ученые ведущих промышленных стран ведут поиск новых композиций и технологических решений, направленных на преодоление основных недостатков этих сплавов - низкой пластичности при комнатной температуре и плохой технологичности.

Следует указать, что продолжающийся более двадцати лет интенсивный поток исследований сплавов этой системы связан с тем, что для них характерна высокая чувствительность деформационных параметров к химическому и фазовому составу, морфологии структурных элементов, а также к многочисленным параметрам тонкой структуры, включающих активность действующих систем сдвига, размер и разориентацию зерен и субзерен, степень дальнего порядка и т.д. Поэтому назрела насущная необходимость поиска принципиально новых подходов к решению комплекса проблем промышленного освоения сплавов на основе Ti-Al интерметаллидов. Важно отметить, что наибольшее внимание до сих пор уделялось сплавам на основе  $\gamma$ -TiAl фазой, поскольку сама по себе  $\alpha_2$ - фаза с упорядоченной гексагональной DO<sub>19</sub> структурой считалась даже менее

пластичной по сравнению с  $\gamma$ -фазой и не рассматривалась как перспективный материал в однофазном состоянии. Однако эту проблему удалось решить за счет дополнительного легирования  $\beta$ -стабилизаторами, прежде всего Nb, а также Mo и V. Однако это существенно снижает весовую эффективность сплавов. В этом плане значительную перспективу представляет временное легирование водородом, которое позволяет повысить технологичность за счет стабилизации водородом  $\beta$ -фазы при деформировании и удалении водорода из полуфабрикатов вакуумным отжигом.

В этой связи диссертационная работа Пожого В.А. является актуальной, направленная на выявлении закономерностей формирования структурного состояния в опытном жаропрочном сплаве Ti-14Al-3Nb-3V-0,5Zr при обратимом легировании водородом и вакуумном ионно-плазменном азотировании с целью оптимизации комплекса технологических, механических и эксплуатационных свойств сплава.

### **Научная новизна работы**

Новым и перспективным представляется сама постановка задачи исследования, а именно использовать технологические принципы термоводородной обработки (ТВО) для пластифицирования сплавов на основе  $\alpha_2$ -фазы. ТВО пытались использовать для пластифицирования сплавов на основе  $\gamma$ -TiAl фазы. Однако эта задача не оказалась достаточно сложной, вероятно из-за того, что сплавы на основе  $\gamma$ -TiAl образуют при нагреве, необходимом для диффузионного насыщения водородом на поверхности малопроницаемую пленку оксида на основе оксида алюминия. В этом плане использование сплава на основе  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al фазы, которая при окислении образует на поверхности более хорошо проницаемый оксид на основе титана является эффективным и оригинальным решением, которое можно рассматривать как новый подход к решению материаловедческих задач, связанным с поиском технологических проблем применения интерметаллидных сплавов на основе системы Ti-Al.

Вторым принципиальным достоинством работы является исследование взаимодействия сплава на основе  $\alpha_2$ -фазы с азотом в процессах вакуумного

ионно-плазменного азотирования. Важность этой части работы не ограничивается только решением практически важной задачи изучения влияния модифицирования поверхности и нанесения TiN покрытий на коррозионные и эрозионные свойства сплава. Изучение диффузии азота в сплавах с упорядоченной кристаллической решеткой дает возможность выявить важные закономерности процессов газонасыщения элементами, которые являются  $\alpha$ -стабилизаторами, которое следует за аналогичным процессом насыщения и удаления водорода, являющегося  $\beta$ -стабилизатором. Установленные в этой части работы закономерности имеют принципиальное научное и практическое значение.

У числу безусловных достоинств работы следует также отнести уточнение температурно-концентрационной диаграммы фазового состава системы водород - сплав Ti-14Al-3Nb-3V-0,5Zr в широком диапазоне концентраций водорода (0,006% - 0,6% масс.) и температур (800 - 1150<sup>0</sup>C). Эти экспериментально установленные результаты имеют принципиальное значение для выбора режимов термоводородной обработки, при которых формируются оптимальные бимодальные структуры с регламентированным соотношением  $\alpha_2$  и  $\beta$ -фаз. При этом установлены корреляции температур и концентраций водорода с объемными долями этих фаз в структуре наводороженного сплава.

Установлено, что оптимальным структурно-фазовым состоянием, обеспечивающим наиболее протяженную упрочненную область при ионном азотировании является бимодальная структура, состоящая из мелкодисперсной смеси  $\beta$ - и вторичной  $\alpha_2(\alpha)$ -фаз. Показано, что вакуумное ионно-плазменное азотирование при температурах 600-650<sup>0</sup>C деформированного листового полуфабриката сплава Ti-14Al-3Nb-3V-0,5Zr с бимодальной структурой приводит к формированию протяженной диффузионной зоны глубиной до 50 мкм, а также к образованию в поверхностном слое нитридов Ti<sub>2</sub>N, TiN и Ti<sub>3</sub>AlN, обеспечивающих высокую микротвердость поверхности.

## **Практическая значимость работы**

Наиболее существенным практическим достижением работы является реализация и демонстрация возможности эффективного применения комплексной технологии обработки опытного жаропрочного сплава на основе  $\alpha_2$ -интерметаллида, включающая кроме самой ТВО, также и найденные оптимальные условия водородного пластифицирования и использование для повышения эррозионных и коррозионных характеристик вакуумное ионно-плазменное азотирование.

Кроме того разработана конкретная водородная технология прокатки листов толщиной 2 мм из литого сплава Ti-14Al-3Nb-3V-0,5Zr, которая состоит из наводороживающего отжига заготовки при температуре 850<sup>0</sup>С до концентрации водорода 0,44%, последующую прокатку с 18 проходами при температурах от 950 до 800<sup>0</sup>С для обеспечения заданных размеров и двухступенчатый вакуумный отжиг при температурах 550<sup>0</sup>+950<sup>0</sup>С или 550<sup>0</sup>+850<sup>0</sup>С.

Показано, что полученный материал обладает высоким уровнем прочностных свойств при нормальной и повышенных температурах (700<sup>0</sup>С) при достаточном уровне пластичности, характерной для сплавов на основе Ti<sub>3</sub>Al. Разработана и реализована технология низкотемпературного (600-650<sup>0</sup>С) вакуумного ионно-плазменного азотирования, позволившая достичь высокого уровня твердости протяженного упрочнённого азотом поверхностного слоя (до 50 мкм) и существенно повысить сопротивление солевой коррозии, жаростойкость при температуре 700<sup>0</sup>С и сопротивление эррозионному воздействию.

## **Достоверность результатов и выводов работы.**

Достоверность результатов, рекомендаций и выводов работы обеспечивается применением современных методических подходов (металлографический и рентгеноструктурный анализы, испытания на растяжение и сжатие при нормальной и повышенной температурах, испытания на коррозионную стойкость, жаростойкость, измерение

микротвердости) и их рациональным использованием применительно к особенностям материала исследования.

#### **Замечания по работе:**

1. В работе установлено, что нанесение покрытий методом вакуумного ионно-плазменного напыления является эффективным для повышения эррозионной стойкости, но не естественно снижает коррозионную стойкость, поскольку этот метод характеризуется значительной пористостью и проницаемостью, поэтому более эффективным являются другие PVD методы, в частности магнетронное напыление.

2. В работе получен новый и перспективный в практическом плане результат снижения скорости окисления образцов с нитридным покрытием, вероятно связанный с заполнением пор, однако этот эффект не был исследован достаточно подробно, что могло бы повысить научную и практическую ценность полученных результатов.

3. При оптимизации температуры и концентрации водорода с целью повышения технологичности сплава при ОМД в качестве структурных параметров учитывали количество первичной  $\alpha$ -фазы, температуру  $(\alpha+\beta)$ - $\beta$  перехода, т.е. структурно-фазовые характеристики сплава при температуре деформации и мало внимания уделяли изучению влияния водорода и режимов деформации на такие характеристики как степень порядка  $\alpha_2$ -фазы, которая определяет пластичность при комнатной температуре.

4. Недостаточно убедительно представлено обоснование выбора материала для исследования, что можно признать допустимым с точки зрения новизны поставленной задачи, но в перспективе желательно найти варианты оптимизации состава сплавов на основе  $\alpha_2$ -фазы применительно к технологии ТВО.

Отмеченные недостатки имеют характер пожеланий и не снижают ценности диссертации

Диссертация прошла апробацию на 11 конференциях различного уровня. По материалам диссертации имеется 10 публикаций, в том числе 8 статей в научных журналах, рекомендованных ВАК.

Автореферат и опубликованные работы отражают ее основные результаты.

### **Заключение**

В целом представленная диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную научно - квалификационную работу, которую можно рассматривать как существенный вклад в материаловедение интерметаллидных сплавов на основе Ti-Al, позволяющий повысить эффективность исследований и разработок в этой перспективной области металловедения авиационных материалов.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа отвечает требованиям п. 9-14 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённом Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, и соответствует специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов, а ее автор – Пожого Василий Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент  
Александров Андрей Валентинович  
Генеральный директор  
ЗАО «Межгосударственная ассоциация Титан»,  
кандидат технических наук



ЗАО «Межгосударственная ассоциация Титан»  
624670, г. Верхняя Салда Свердловской обл.,  
Ул Парковая, 1  
Электронная почта: [isat91@mail.ru](mailto:isat91@mail.ru)  
Тел.: +7-495-446-8950