

## Отзыв

официального оппонента доктора технических наук, доцента, профессора кафедры материаловедения и нанотехнологий ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» **Жеребцова Сергея Валерьевича** на диссертационную работу Поповой Евгении Николаевны «Влияние легирования и термической обработки на стабильность структуры и механические свойства сплавов системы Ti-10Al», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

### Актуальность темы диссертации

Благодаря привлекательной комбинации высокой удельной прочности, хорошей жаропрочности, коррозионной стойкости и биосовместимости, титановые сплавы находят широкое применение в самых различных отраслях промышленности. В то же время при довольно высокой температуре плавления жаропрочность титановых сплавов сравнительно невысока из-за полиморфного превращения, протекающего при  $882^{\circ}\text{C}$ . Поэтому используемые в настоящее время жаропрочные титановые сплавы (обычно на основе псевдо альфа сплава с твердорастворным упрочнением) может эксплуатироваться до  $\sim 600^{\circ}\text{C}$ . Одна из возможных стратегий повышения высокотемпературной прочности связана с упрочнением частицами интерметаллидной  $\alpha_2$  фазы ( $\text{Ti}_3\text{Al}$ ). Однако понимание закономерностей формирования таких частиц требует изучения особенностей легирования, термической обработки и получаемых свойств титановых сплавов, в том числе и потому, что выделение  $\alpha_2$  фазы может приводить к существенному снижению пластичности при комнатной температуре. Поэтому актуальность диссертационной работы Поповой Евгении Николаевны, направленной на изучение закономерностей процессов формирования структуры с большим количеством интерметаллидной фазы  $\alpha_2$  ( $\text{Ti}_3\text{Al}$ ) в модельных сплавах системы

Ti-10%Al в зависимости от термической обработки, и установление ее влияния на комплекс механических свойств, не вызывает сомнений.

### **Структура и основное содержание работы.**

Диссертационная работа Поповой Е.Н. изложена на 97 страницах, содержит 48 рисунков, 6 таблиц. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, заключения и списка литературы из 76 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи работы, а также положения, выносимые на защиту. Излагается мнение автора о научной новизне и практическом значении полученных результатов.

В первой главе автор приводит общие сведения о жаропрочных титановых сплавах и подходах к их легированию. Представлены и проанализированы литературные данные о процессах выделения упорядоченной интерметаллидной фазы  $Ti_3Al$  ( $\alpha_2$ ). На основании выполненного обзора сформулирована цель работы и поставлены задачи исследования.

Во второй главе изложено описание исследуемых сплавов, схем термических обработок, методик исследований и используемое при выполнении исследований оборудование. В работе «базовый» сплав Ti10Al легируется бета стабилизаторами (Mo, Nb) и нейтральными упрочнителями (Zr, Sn, Si).

В третьей главе приводятся результаты исследования структуры закаленных из бета области ( $1200^\circ C$ ) и состаренных при  $650^\circ C$  сплавов. Установлено влияние легирующих элементов на параметры решетки  $\alpha'$  мартенсита и  $\alpha_2$  фазы после закалки и старения. С использованием сканирующей и просвечивающей микроскопии исследованы формирующиеся в сплавах структуры. Выявлены закономерности влияния легирования на процесс образования  $\alpha_2$  фазы. Показано, что введение циркония и олова минимизирует несоответствие решеток матрицы и упорядоченной фазы, что может способствовать более высокой жаропрочности.

В четвертой главе представлены результаты по влиянию легирования на структуру сплавов, закаленных из двухфазной ( $\alpha+\beta$ )-области ( $950^{\circ}\text{C}$ ), и состаренных при  $650^{\circ}\text{C}$ . Описаны структура и фазовый состав, формирующиеся в ходе такой обработки. Проведена оценка распределения легирующих элементов в фазах. Определены параметры решетки фаз в зависимости от системы легирования. Установлено формирование «ячеисто подобного» контраста, обусловленного, по мнению автора, с развитием гомогенного превращения (в отличие от распада мартенситной структуры с образованием и ростом дисперсных упорядоченных частиц  $\alpha_2$  фазы).

В пятой главе представлены результаты по влиянию легирования и термической обработки на механические свойства сплавов. Показан рост микротвердости в ходе закалки и последующего старения, связанный с формированием дисперсных частиц интерметаллидной фазы. Выявлен разный механизм упрочнения в сплавах, в зависимости от температуры закалки и механизмf образования  $\alpha + \alpha_2$  –структуры. Проведение механических испытаний на сжатие показало, что реализация спинодального механизма распада способствует получению более высокой пластичности при достаточно высоких прочностных характеристиках.

Заключение содержит основные выводы диссертационного исследования.

**Достоверность и обоснованность положений и выводов диссертации** обеспечивается использованием современных методов исследования и оборудования. Воспроизводимость экспериментальных результатов подтверждается достаточно большим массивом данных. Научные положения, выносимые на защиту и выводы, сформулированные в работе, обоснованы физически адекватной интерпретацией экспериментальных данных, качественным совпадением авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках по аналогичной тематике. Основные результаты прошли апробацию на научных конференциях российского и международного уровня, опубликованы в журналах из перечня ВАК и БД

Scopus, WoS. Надежность полученных результатов, а также обоснованность научных положений и сделанных выводов не вызывает сомнений.

### **Научная новизна**

В качестве наиболее важных научных результатов работы, определяющих ее новизну, необходимо отметить следующие:

1. Установлено, что в процессе распада  $\alpha'$ - мартенсита, сформированного закалкой с температур  $\beta$ -области, в легированных сплавах системы Ti10%Al при отпуске наблюдается формирование высокодисперсной смеси  $\alpha$ ,  $\alpha_2$  и  $\beta$  – фаз.

2. Показано, что формирование двухфазной  $\alpha + \alpha_2$  –структуры в процессе длительного старения в легированных сплавах на основе системы Ti10%Al, закаленных с 950°C, в пластинах первичной  $\alpha$  - фазы протекает по механизму, близкому к спинодальному.

3. Установлено, что реализация спинодального механизма распада пересыщенного  $\alpha$  – твердого раствора способствует получению более высоких пластических свойств при достаточно высокой прочности.

Результаты работы, определяющие ее новизну, в полном объеме отражены в выводах диссертации и не вызывают сомнений.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Теоретическая значимость полученных в представленном исследовании результатов заключается в установлении влияния легирования на процессы формирования структуры в сплаве Ti-10%Al при закалке с различных температур и последующем старении.

Практическая ценность заключается в выявленной возможности управления процессом формирования упорядоченной структуры путем изменения фазового состава за счет термической обработки. Показано, что формирование двухфазной  $\alpha + \alpha_2$  –структуры по гомогенному механизму позволяет обеспечить повышенную пластичность при высоких прочностных характеристиках и тем самым обеспечить повышенный ресурс работы материала при требуемых температурах.

Полученные в исследовании результаты используются в качестве опорного материала для анализа структуры и свойств сплавов, выплавляемых в промышленных условиях на Корпорации ВСМПО-АВИСМА, и нацелены на создание новых жаропрочных сплавов и оптимизацию режимов их термической обработки.

Содержание автореферата Поповой Е.Н. соответствует содержанию диссертации и опубликованных работ.

### **Замечания по диссертационной работе Поповой Е.Н.**

1. Хотя в целом предположение о позитивном влиянии снижения величины  $\Delta V/V$  на жаропрочность представляется верным, анализ несоответствия решеток только через изменения объема без оценки ориентационного соотношения и вариации соответствующих линейных параметров решеток не является полным.

2. В отличие от сплавов с ГЦК решеткой, где склонность к двойникованию связана с величиной ЭДУ, в ГП кристаллах двойникование обусловлено затрудненностью деформации в направлении 'с' (стр. 50 диссертации).

3. Не вполне понятно, чем обусловлена реализация спинодального механизма образования  $\alpha+\alpha_2$  –структуры в ходе старения после закалки из двухфазной области.

4. В диссертации не приведены высокотемпературные свойства полученных сплавов, что было бы полезно для демонстрации более высокой жаропрочности за счет формирования  $\alpha_2$  частиц. Какая из полученных структур (после закалки из однофазной или двухфазной области), по мнению автора, будет обладать лучшими жаропрочными свойствами?

### **Заключение по работе**

Диссертация Поповой Евгении Николаевны на соискание ученой степени кандидата технических наук является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена задача влияния легирования и термической обработки на стабильность структуры и механические свойства

сплавов системы Ti-10Al. Решенные в диссертации задачи имеют существенное значение для развития материаловедения жаропрочных титановых сплавов и производства из них деталей авиационной техники.

Отмеченные замечания не снижают значимости полученных результатов и выводов и не влияют на общую положительную оценку диссертации Поповой Е.Н.

Диссертация соответствует специальности 2.6.1. Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallorv i spлавов (технические науки), отвечает требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, а ее автор, Попова Евгения Николаевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallorv i spлавов.

**Официальный оппонент:**

Официальный оппонент:

Жеребцов Сергей Валерьевич,

д.т.н, доцент,

профессор кафедры

материаловедения и нанотехнологий

Института инженерных и

цифровых технологий

Жеребцов Сергей Валерьевич

308015, Белгородская область, г. Белгород, ул. Победы, д. 85

e-mail: zherebtsov@bsu.edu.ru

телефон: 8-4722-585416

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет».

Личную подпись удостоверяю Ведущий специалист по кадрам управления по развитию персонала и кадровой работе	<i>Жеребцова</i>
	<i>Мис Мис</i>

