

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента  
на диссертационную работу

Николаева Алексея Александровича

«Закономерности формирования интерметаллидных поверхностных слоев при ионно-плазменной обработке сплава ВТ6 для повышения триботехнических свойств», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

### **Актуальность работы**

Титановые сплавы используются в качестве конструкционного материала в авиационной и аэрокосмической промышленности, а также как функциональные материалы в медицине. Несмотря на такие преимущества титановых сплавов, как малый вес, высокая коррозионная стойкость, высокие удельные прочностные свойства и др., существует проблема интенсивного изнашивания титановых сплавов в парах трения с большинством материалов. Поэтому решение вопроса повышения износостойкости титановых сплавов является важной прикладной задачей.

С целью повышения износостойкости титана в настоящее время ведутся разработки по созданию на его поверхности оксидных, нитридных и интерметаллидных покрытий. Поэтому работа Николаева А.А., посвященная изучению вопросов получения интерметаллидных поверхностных слоев при ионно-плазменной обработке алюминиевого покрытия на титановом сплаве ВТ6 несомненно является актуальной.

### **Общая характеристика работы**

Диссертационная работа Николаева А.А. состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Во введении сформулированы актуальность темы, ее научная новизна и практическая значимость, достоверность результатов, апробация работы и публикации.

В первой главе приведены характеристики титана и его сплавов и обзор существующих способов повышения износостойкости титановых сплавов.

Во второй главе приведены материалы используемых образцов, описание установки для осаждения покрытий и модификации поверхности, а также методики исследования структуры, фазового состава и эксплуатационных свойств.



В третьей главе содержится описание исходной структуры титанового сплава и алюминиевого покрытия, градиентных интерметаллидных слоев, которые были сформированы в результате нанесения на сплав ВТ6 алюминиевого покрытия и обработки в плазме несамостоятельного дугового разряда низкого давления (в зависимости от толщины алюминиевого покрытия, температуры и продолжительности ИПО).

В четвертой главе представлены результаты измерения микротвердости, оценки триботехнических свойств разработанных слоев по сравнению с применяемыми технологиями упрочнения титановых сплавов, проведено сравнение адгезионной прочности, а также предложена технология получения интерметаллидных слоев и ее апробация на деталях «шатун».

Основные выводы работы подтверждены полученными экспериментальными результатами.

В целом, диссертационная работа написана технически грамотным языком. Каждая глава содержит важные результаты исследования автора и сопровождается развернутыми выводами. Диссертация оформлена в соответствии с ГОСТ 7.01.11-2011.

**Научная новизна** диссертационной работы Николаева А. А. не вызывает сомнения и заключается в получении новых экспериментальных данных о закономерностях получения градиентных интерметаллидных слоев в результате ионно-плазменной обработки алюминиевого покрытия на титановом сплаве ВТ6, а именно:

- показано, что при ионно-плазменной обработке в плазме несамостоятельного дугового разряда низкого давления поверхности образцов титанового сплава ВТ6, с предварительно нанесенным вакуумно-дуговым покрытием из алюминия, приводит к формированию интерметаллидных фаз системы Ti-Al следующего состава:  $TiAl_3$ ,  $TiAl$  и  $Ti_3Al$ , в то время как вакуумный отжиг таких образцов при аналогичных температурно-временных режимах приводит к формированию только интерметаллида  $TiAl_3$ .

- установлено, что в результате ионно-плазменной обработке при температуре 500 °С в течение 1 часа происходит формирование интерметаллидных фаз как в исходном алюминиевом покрытии, так и в основном сплаве ВТ6. В покрытии формируется фаза  $TiAl_3$  и нанокристаллическая структура на основе твердого раствора  $Al(Ti)$ , а в титановом сплаве образуются фазы  $TiAl_3$ ,  $TiAl$  и  $Ti_3Al$ .

- установлено, что уменьшение температуры ионно-плазменной обработки на 50 °С приводит к уменьшению толщины интерметаллидного слоя в титановой основе на 50% и изменению фазового состава на  $TiAl_3$ . При



уменьшении толщины исходного алюминиевого покрытия с 2,5 до 0,5 мкм интерметаллидный слой состоит преимущественно из фазы TiAl.

- показано, что покрытия на основе интерметаллической фазы TiAl обладают износостойкостью сопоставимой с покрытием TiAlN, но с большей адгезионной прочностью и коэффициентом упругого восстановления.

### **Теоретическая и практическая значимость исследования**

Несомненную теоретическую и практическую значимость представляют следующие, полученные Николаевым А.А. результаты:

1. установление возможности получения интерметаллидных слоев разного стехиометрического состава TiAl<sub>3</sub>, TiAl и Ti<sub>3</sub>Al в результате низкотемпературной (500 °С) ионно-плазменной обработке образцов из титанового сплава ВТ6 с предварительно осажденным алюминиевым покрытием.

2. выявление взаимосвязи параметров обработки (температура, продолжительность ионно-плазменной обработки и толщина исходного алюминиевого покрытия) и структурно-фазового состояния получаемых интерметаллидных поверхностных слоев в титановом сплаве ВТ6.

3. разработка режимов ионно-плазменной обработки, обеспечивающих получение интерметаллидных слоев на основе эквиатомной фазы TiAl, которые позволяют повысить износостойкость сплава ВТ6 при сухом трении в паре со стальным контртелом.

### **Степень достоверности результатов и научных положений**

Достоверность полученных результатов, научных положений и выводов основана на адекватной интерпретации полученных экспериментальных данных, сопоставлением результатов оригинальных исследований с имеющимися в современной литературе экспериментальными и теоретическими данными других авторов. Эксперименты выполнены с использованием высокотехнологичного промышленного оборудования, которое применяется на предприятиях для нанесения вакуумно-дуговых покрытий. Исследования проведены с использованием поверенного оборудования с лицензионным программным обеспечением и методик современного материаловедения. Представленные результаты прошли широкое обсуждение на российских и международных научных конференциях и опубликованы в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК.



## **Замечания по диссертационной работе:**

### Глава 2:

1. В п. 2.2.4. необходимо было дать пояснения по выбору параметров трибологических испытаний: усилие – 10 Н, скорость скольжения – 0,1 м/с и по выбору материала контртела – закаленной стали марки ШХ15.

### Глава 3:

2. На рис. 3.6 приведены результаты ЭДА, возникает вопрос, почему в титановой подложке ВТ6 не обнаружено содержание ванадия?

4. На рис. 3.9, 3.18 и 3.23 фаза TiAl идентифицирована 1 пиком при  $\sim 45^\circ$ , возникает вопрос в правильности идентификации этого пика и фазы. Также следует отметить некоторые неточности: 1. на 85 стр. диссертации: «Интенсивность пика, который характеризует фазу TiAl, становится выше с ростом продолжительности ИПО», но рис. 3.18 этого не подтверждает; 2. на 87 стр. диссертации указано, что «При этом интенсивность рефлексов от TiAl<sub>3</sub> выше, чем при температуре обработки 500 °С», но рис. 3.22 также это не подтверждает.

### Глава 4:

5. В табл. 4.1. приведены режимы обработки испытуемых образцов. Однако, на износостойкость покрытия, в том числе, влияние оказывает и его толщина (тем более, что в диссертации приведены образцы, у которых произошло полное истирание интерметаллидного слоя). Поэтому необходимо было привести толщину полученных покрытий для каждого образца и установить влияние толщины покрытия на износостойкость.

6. На рис. 4.5 приведено РЭМ изображение трека износа титановой подложки, но не понятно, почему не определен ванадий. Аналогичный вопрос по рис. 4.8, 4.9, где сказано, что для данных образцов произошло полное истирание интерметаллидного слоя.

7. При изучении влияния коэффициента трения необходимо было привести исходную шероховатость покрытий, т.к. на рис. 4.4 а, в, г, д наблюдаются большие скачки коэффициента трения во времени. В диссертации стоило обратить на этот момент влияние и выявить причину.

8. Общее замечание по оформлению диссертации: по тексту встречаются ошибки и опечатки, например, «интерметаллидных», «интерметаллические», «интерметаллдиных» и др.

Сделанные замечания не снижают научной и практической ценности диссертации и общей высокой оценки работы и являются рекомендательными, либо уточняющими некоторые моменты.

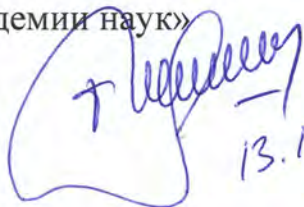


## Заключение

Диссертационная работа Николаева Алексея Александровича выполнена на высоком научно-техническом уровне. Она представляет собой самостоятельную законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены научно-обоснованные технологические решения по модифицированию поверхности титанового сплава ВТ6, обеспечивающих его высокие эксплуатационные свойства за счет формирования заданной поверхностной структуры. По теме диссертации опубликовано 17 научных работ, в том числе – 3 статьи в научных журналах из перечня ВАК, 4 статьи в журналах библиографической базы Scopus. Несомненным плюсом работы является акт от АО Гаврилов-Ямский машиностроительный завод «АГАТ» об использовании результатов работы по повышению износостойкости шатунов в паре трения со стальным коленчатым валом.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.п. 9-16 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор Николаев Алексей Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

Официальный оппонент,  
доктор технических наук,  
заместитель директора по научной работе  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
«Института структурной макрокинетики и  
проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова  
Российской академии наук»

  
13.11.2023г.

Бажин Павел Михайлович

Подпись Бажина П.М. удостоверяю

ученый секретарь



Петров Е.В.

Тел.: +7 (49652) 46-555

E-mail: bazhin@ism.ac.ru

Адрес организации: 142432, РФ, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д.8