

МИНОБРНАУКИ РОССИИ


Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего
образования

**"Сибирский государственный
индустриальный университет"
(СибГИУ)**

Кирова ул., зд. 42, г. Новокузнецк,
Центральный район,
Кемеровская область – Кузбасс, 654007
Тел.: (3843) 77-79-79. Факс (3843) 46-57-92
E-mail: rector@sibsiu.ru
http://www.sibsiu.ru

№ _____
на № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор по научной
и инновационной деятельности
ФГБОУ ВО «СибГИУ»
д.т.н., профессор

 С. В. Коновалов
«10» октября 2023 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Николаева Алексея Александровича на тему «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

Титан и сплавы на его основе активно используются в авиационной, морской, аэрокосмической технике, а также в медицине. Характерной особенностью титановых сплавов являются высокие удельные прочностные свойства и коррозионная стойкость. В то же время, низкие триботехнические характеристики титановых сплавов значительно ограничивают возможность использования титановых сплавов в качестве конструкционных материалов ответственных элементов машин и механизмов.

Одним из наиболее эффективных методов повышения триботехнических характеристик является модификация поверхности для получения покрытий и поверхностных слоев с градиентным составом, структурой и свойствами. Такой подход позволяет снизить затраты на разработку новых материалов и/или использование более дорогих сплавов. Диффузионное насыщение поверхности титановых сплавов алюминием и формирование интерметаллических соединений системы Ti-Al являются одними из возможных подходов для получения таких

слоев. Однако существующие методы их получения в температурном интервале старения титанового сплава ВТ6 (450–550 °С) позволяют сформировать только интерметаллическую фазу $TiAl_3$, которая является хрупкой и не обладает достаточной износостойкостью. Фазы $TiAl$ и Ti_3Al устойчивы к окислению и обладают высокой износостойкостью, но для их образования необходимо повышать температуру обработки. Поэтому актуальной задачей материаловедения является поиск возможностей получения интерметаллидов с меньшим содержанием алюминия без увеличения температурного интервала обработки.

В этой связи диссертационная работа Николаева А.А., направленная на исследование влияния характеристик алюминиевого покрытия, используемого в качестве источника диффундирующего элемента, а также параметров последующей ионно-плазменной обработки на фазовый состав и микроструктуру обрабатываемых титановых сплавов, представляет несомненную актуальность как с научной, так и с практической точки зрения.

Общая характеристика работы

Достоинством диссертационной работы Николаева А.А. является то, что автору удалось подробно исследовать влияние характеристик исходного алюминиевого покрытия и режимов последующей ионно-плазменной обработки на закономерности формирования интерметаллидов системы $Ti-Al$ как в исходном алюминиевом покрытии, так и в титановой основе. Для этих интерметаллических слоев были проведены исследования триботехнических свойств и адгезионной прочности с основным материалом. В работе предложен подход получения интерметаллидных поверхностных слоев системы $Ti-Al$ в титановом сплаве ВТ6, который заключается в предварительном осаждении алюминиевого покрытия и последующей низкотемпературной обработке (500 °С) в плазме несамостоятельного дугового разряда низкого давления. На этой основе автором предложены технологические режимы получения интерметаллидных слоев на основе фазы $TiAl$, обеспечивающие повышение износостойкости сплава ВТ6 до 60 раз в условиях сухого трения в паре со стальным контртелом.

Представляет научный интерес исследование тонкой структуры получаемых интерметаллидных слоев, которые показали, что при ионно-плазменной обработке исходного алюминиевого покрытия на титановом сплаве ВТ6 формируется

градиентный по фазовому составу и структуре композиционный слой. В нем фазы расположены в следующем порядке (от поверхности к матрице):

$[TiAl_3 \rightarrow TiAl_3 + \text{нк}-(Al(Ti) + \alpha-Ti) \rightarrow \text{нк}-(Al(Ti) + \alpha-Ti)] \rightarrow [TiAl_3 \rightarrow TiAl_3 + TiAl \rightarrow TiAl \rightarrow Ti_3Al \rightarrow \alpha-Ti \rightarrow (\alpha + \beta)-Ti(Al,V)]$, нк- нанокристаллическая область. Микроструктура от поверхности к матрице изменяется следующим образом:

$[Мелкое зерно (ИМ) \rightarrow мелкое зерно (ИМ) + \text{нанокристаллиты } (Al(Ti) + \alpha-Ti) \rightarrow \text{нанокристаллиты } (Al(Ti) + \alpha-Ti)] \rightarrow \text{граница раздела «покрытие/подложка»} \rightarrow [УМЗ (ИМ) \rightarrow мелкое зерно (\text{исходный сплав})]$, где ИМ – интерметаллидная фаза. Квадратные скобки объединяют фазы в покрытии и в подложке, соответственно. Важным результатом проведенного микроструктурного анализа является подтверждение возможности формирования эквиатомного TiAl и обогащенного титаном Ti₃Al интерметаллидов при температуре обработки 500°C.

Практическая значимость работы включает разработанные технологические режимы для получения интерметаллидных слоев требуемого фазового состава, которые обладают повышенными триботехническими свойствами в условиях сухого трения. Немаловажно, что разработанные автором рекомендации прошли успешную апробацию при изготовлении опытной партии шатунов из титанового сплава ВТ6 на предприятии «АО Гаврилов-Ямский машиностроительный завод «АГАТ».

Наиболее важные полученные результаты

Научная новизна диссертационной работы Николаева А.А. не вызывает сомнения и заключается в следующем:

- Показано, что ионно-плазменная обработка с применением аргоновой плазмы 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: TiAl₃, TiAl и Ti₃Al. В свою очередь вакуумный отжиг таких образцов с использованием аналогичных технологических режимов обработки сопровождается формированием интерметаллида только одного состава TiAl₃.

- Установлено, в результате ионно-плазменной обработки при температуре 500 °С в течение 1 часа происходит образование интерметаллидных фаз как в исходном алюминиевом покрытии, так и в титановой основе. При этом в алюминиевом покрытии образуется фаза $TiAl_3$ и нанокристаллическая структура на основе твердого раствора $Al(Ti)$ вблизи границы раздела «покрытие-титановый сплав», а в титановой основе формируются фазы $TiAl_3$, $TiAl$ и Ti_3Al . По мере удаления от обрабатываемой поверхности фазовый состав модифицированного слоя изменяется в последовательности $TiAl_3 - Al(Ti) - TiAl_3 - TiAl - Ti_3Al - \alpha-Ti(Al) - (\alpha+\beta) Ti(Al, V)$.

- Экспериментально установлено влияние режимов ионно-плазменной обработки (температуры и продолжительности), а также толщины исходного алюминиевого покрытия на структуру и фазовый состав получаемых композиционных слоев. Показано, что уменьшение температуры ионно-плазменной обработки на 50 °С вызывает уменьшение толщины интерметаллидного слоя в титановой основе на 50%, а также изменение его фазового состава на интерметаллид $TiAl_3$. Уменьшение толщины исходного покрытия до 0,5 мкм позволяет сформировать модифицированный слой, состоящий преимущественно из интерметаллида $TiAl$.

- Установлено влияние фазового состава поверхностного композиционного слоя на износостойкость поверхностно-упрочненного титанового сплава ВТ6. Покрытия на основе интерметаллида $TiAl$ показали высокую износостойкость, сопоставимую с износостойкостью покрытия $TiAlN$, при этом покрытие $TiAl$ обладает большей адгезионной прочностью и коэффициентом упругого восстановления.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Анализ цели и задач диссертации, полученных экспериментальных результатов и научных закономерностей, а также сформулированных выводов и практических рекомендаций позволяет заключить, что диссертация Николаева Алексея Александровича «Закономерности формирования интерметаллидных поверхностных слоев при ионно-плазменной обработке сплава ВТ6 для повышения триботехнических свойств» соответствует паспорту научной специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов» согласно

Номенклатуре специальностей научных работников, утвержденной Приказом Минобрнауки РФ от 24 февраля 2021 г. № 118 в частях:

П. 1 – «Изучение взаимосвязи химического и фазового составов (характеризуемых различными типами диаграмм, в том числе диаграммами состояния) с физическими, механическими, химическими и другими свойствами сплавов.»

Исследовано влияние фазового состава интерметаллидных покрытий на механические (микротвердость) и эксплуатационные (износостойкость) свойства сплава ВТ6. Показано, что покрытия на основе интерметаллида TiAl имеют высокую износостойкость, сопоставимую с износостойкостью покрытия TiAlN, при этом покрытие TiAl обладает большей адгезионной прочностью и коэффициентом упругого восстановления.

П. 2 – «Теоретические и экспериментальные исследования фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах, происходящих при различных внешних воздействиях, включая технологические воздействия, и влияние сварочного цикла на металл зоны термического влияния, их моделирование и прогнозирование.»

Исследованы структура и фазовый состав покрытия и поверхностных слоев, формируемых в сплаве ВТ6 при ионно-плазменной обработке предварительно нанесенного алюминиевого покрытия. Показано, что применение аргоновой плазмы несамостоятельного дугового разряда низкого давления для ионно-плазменной обработки поверхности образцов титанового сплава ВТ6, с предварительно нанесенным вакуумно-дуговым покрытием из алюминия, приводит к формированию интерметаллидных фаз системы Ti-Al следующего состава: TiAl₃, TiAl и Ti₃Al.

П. 4 – «Теоретические и экспериментальные исследования термических, термоупругих, термопластических, термохимических, термомагнитных, радиационных, акустических и других воздействий на изменение структуры и свойств металлов и сплавов, их моделирование и прогнозирование.»

Исследовано влияние температуры ионно-плазменного воздействия на изменение структуры и фазового состава получаемых покрытий. Показано, что уменьшение температуры ионно-плазменной обработки от 500 °С до 450 °С

вызывает уменьшение толщины интерметаллидного слоя в титановой основе на 50% и изменение его фазового состава – образуется только интерметаллид $TiAl_3$.

П. 6 – «Разработка новых и совершенствование существующих технологических процессов объемной и поверхностной термической, химикотермической, термомеханической и других видов обработок, связанных с термическим или термомеханическим воздействием, цифровизация и автоматизация процессов, а также разработка информационных технологий систем сквозного управления технологическим циклом, специализированного оборудования.»

Предложена технология ионно-плазменной обработки деталей «Шатун» из титанового сплава ВТ6 с целью получения износостойких интерметаллидных покрытий системы Ti-Al, обеспечивающих повышение триботехнических свойств сплава ВТ6.

Рекомендации по практическому использованию основных результатов диссертации

Представленные в диссертационной работе новые научные результаты и практические разработки в области металловедения, материаловедения и технологии получения функциональных композиционных поверхностных слоев и покрытий могут быть использованы в качестве основы для дальнейших исследований, направленных на совершенствование существующих и создание новых композиционных покрытий и поверхностных слоев, применяемых для повышения износостойкости деталей для авиакосмической, транспортной, медицинской и других наукоемких отраслей промышленности.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных в диссертационной работе научных результатов подтверждается применением современных методов исследования. Структурные исследования проведены методами растровой и просвечивающей электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа. Механические, триботехнические свойства и адгезионную прочность интерметаллидных покрытий оценивали по результатам общепринятых стандартизированных методик.

Научные выводы и практические рекомендации работы проверены при изготовлении опытной партии шатунов.

Замечания

Отмечая достоинства диссертационной работы А.А. Николаева, в качестве замечаний следует указать:

1. Из текста диссертации не ясно почему для исследования был выбран именно сплав ВТ6, а не его более прочный современный аналог ВТ8М1?

2. Из каких соображений выбирался материал контртела для трибологических испытаний? Почему не был выбран более износостойкий электрокорунд?

3. При вакуумно-дуговом осаждении покрытий в металлической плазме присутствует капельная фракция, которая отрицательно сказывается на свойствах покрытия, однако, в тексте диссертации не упоминается использовались ли методы ее фильтрации?

4. В главе 3 термическая стабильность нанокристаллического слоя алюминия объясняется наличием кислорода, который препятствует росту зерен. Однако на элементном анализе исходного покрытия и после его ионно-плазменной обработки (таблицы 3.1–3.2) отсутствуют данные о наличии кислорода.

5. В работе присутствуют неточности оформления, встречаются, хотя и не часто, грамматические ошибки.

Заключение

Представленная диссертационная работа выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены закономерности формирования интерметаллидных поверхностных слоев в результате ионно-плазменной обработке образцов из сплава ВТ6 с алюминиевым покрытием.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на 5 научно-технических конференциях, опубликованы в 17 научных работах, из них 3 – в изданиях, входящих в перечень ВАК, и 4 – в журналах, включенных в международные системы цитирования.

Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная работа является законченной научно-квалификационной работой,

соответствующей п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. N 842 (с последующими изменениями), в которой содержатся новые научно обоснованные научно-технические и технологические решения, обеспечивающие получение диффузионных слоев на основе интерметаллидов системы Ti-Al на титановом сплаве ВТ6, обеспечивающие повышение износостойкости, 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».

Отзыв рассмотрен и одобрен на расширенном заседании кафедры естественнонаучных дисциплин СибГИУ, протокол № 3 от «05» октября 2023 года. На заседании присутствовало 15 человек. Результаты голосования: «за» - 15, против – нет, воздержавшихся - нет.

Заведующий кафедрой
естественнонаучных дисциплин им.
Профессора В.М. Финкеля, доктор
физико-математических наук
(специальность 01.04.07 – Физика
конденсированного состояния),
профессор

Громов Виктор
Евгеньевич

Ученый секретарь кафедры
естественнонаучных дисциплин им.
Профессора В.М. Финкеля, кандидат
технических наук (специальность
01.04.07 – Физика
конденсированного состояния),
доцент

Мартусевич Елена
Владимировна

Подписи В.Е. Громова и
Е.В. Мартусевич удостоверяю
Начальник отдела кадров СибГИУ



Миронова Татьяна
Анатольевна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет» (СибГИУ)

654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, зд. 42

E-mail: rector@sibsiu.ru; Тел.: +7 (3843) 77-79-79