

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертационную работу

Тагирова Айнура Фиргатовича

«Влияние режимов низкотемпературного ионного азотирования на механические характеристики поверхностного слоя сложнопрофильных деталей из сплава ВТ6», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 - Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

### **Актуальность темы диссертационной работы**

Применение блисков в современных авиационных газотурбинных двигателях, несмотря на всю сложность их изготовления, включая получение сложного профиля, временные затраты, использование специального инструмента и многокоординатного оборудования, позволяет значительно снизить вес ротора. При этом для обеспечения ресурса и эксплуатационной надежности лопаток блисков применяют ряд методов их обработки и упрочнения.

Поскольку для производства первых четырех ступеней компрессора применяют титановые сплавы, высокотемпературная обработка которых может привести к снижению прочностных свойств из-за полиморфных превращений в сплавах, возникает потребность в проведении комплексных исследований по влиянию режимов низкотемпературного ионного азотирования поверхности титановых сплавов на структурно-фазовые и механические характеристики поверхностного слоя, а также в разработке технологии модифицирования поверхности сложнопрофильных деталей из титановых сплавов.

### **Содержание диссертационной работы**

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Технология машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет

науки и технологий». Структурно работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы составляет 128 страниц машинописного текста, содержащего 47 иллюстраций, 8 таблиц и список литературы из 127 наименований.

**Во введении** к работе проведен общий анализ исследуемой проблемы, показана роль и место титановых сплавов в газотурбинных двигателях, обоснована актуальность разработки технологии низкотемпературного ионного азотирования поверхности сложнопрофильных деталей из титанового сплава ВТ6, сформулирована цель, отмечена научная новизна, практическая значимость, достоверность и обоснованность научных положений, перечислены конференции, на которых докладывались и обсуждались отдельные вопросы диссертации.

**В первой главе** проведен подробный и скрупулезный анализ публикаций, посвященных современным методам поверхностного модифицирования титановых сплавов и, в частности, существующим технологиям ионного азотирования титановых сплавов. Проведенный анализ отечественных и зарубежных публикаций по влиянию параметров ионного азотирования на формирование модифицированной поверхности, а также на остаточные напряжения и усталостную прочность позволил автору показать перспективность низкотемпературного ионного азотирования, сформулировать цель и задачи представленного исследования.

**Во второй главе** определен объект исследования и описаны методики проведения исследований и испытаний по оценке влияния различных технологических параметров низкотемпературного ионного азотирования (состав рабочего газа, длительность процесса, температура обработки) на поверхностные свойства титановых сплавов, включая, микроструктуру, фазовый состав, микротвердость и остаточные напряжения в поверхностном слое. Представлены общий вид, схемы и принцип работы установок для проведения низкотемпературного ионного азотирования в тлеющем разряде и в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде. Представленные в работе

методики проведения исследований и испытаний позволили автору в полном объеме оценить уровень структурно-фазовых и механических характеристик поверхностного слоя сложнопрофильных деталей из титановых сплавов.

**Третья глава** посвящена исследованию технологических параметров двух методов низкотемпературного ионного азотирования (в тлеющем разряде и в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде) на формирование фазового состава, структуру и глубину модифицированного слоя. Показано, что несмотря на различия двух методов азотирования, в обоих случаях наблюдается эффект модифицирования поверхности титанового сплава ВТ6 при относительно низких температурах и малой длительности обработки. Во всех исследованных случаях повышение температуры обработки и времени азотирования приводит к увеличению микротвердости и глубины азотированного слоя. Также отмечено, что с повышением температуры шероховатость обрабатываемой поверхности увеличивается в 2-2,5 раза.

**Четвертая глава** посвящена исследованию влияния низкотемпературного ионного азотирования на поверхностные остаточные напряжения. Рассмотрены методы определения остаточных напряжений, исследовано влияние низкотемпературного ионного азотирования на остаточные напряжения в поверхностном слое. Показано, что температура азотирования влияет на знак и величину поверхностных остаточных напряжений, которые формируются растягивающими после низкотемпературного ионного азотирования в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде и сжимающими – после обработки в тлеющем разряде.

В **пятой главе** представлена технология низкотемпературного ионного азотирования имитатора моноколеса компрессора ГТД в тлеющем разряде и приведены результаты обработки опытной партии лопаток из титанового сплава ВТ6 по отработанным режимам в тлеющем разряде и в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде. Производственные испытания опытной технологии низкотемпературного ионного азотирования имитатора моноколеса

компрессора ГТД в тлеющем разряде из титанового сплава ВТ6 выполнены и рекомендованы к использованию в НПА «Технопарк АТ».

Заключение по работе отражает суть и содержание выполненной работы. Список литературы по теме диссертации достаточен, включает в себя 127 источников. В список включены патенты, книги и современные научные статьи, посвященные исследованию ионного азотирования, что свидетельствует о глубокой проработке автором научной и технической литературы.

### **Научная новизна работы**

Выполненное диссертационное исследование позволило получить ряд новых научных результатов, обладающих существенной новизной. Новизна технических решений подтверждается тремя патентами РФ.

Показано, что ионное азотирование при температурах 450-500°C приводит к образованию  $\alpha$ -раствора азота в поверхностном слое титанового сплава ВТ6. Ионное азотирование при температурах 550-600°C приводит к образованию нитридов титана в структуре сплава с различным стехиометрическим составом  $Ti_xN_y$ .

Установлено, что на поверхности образцов из титанового сплава ВТ6, азотированных в тлеющем разряде, формируются сжимающие напряжения. Показано, что уменьшение температуры азотирования с 600°C до 450°C приводит к росту величины сжимающих напряжений.

Установлено, что после ионного азотирования в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде на поверхности образцов из титанового сплава ВТ6 возникают растягивающие напряжения. Показано, что снижение температуры азотирования с 600°C до 450°C ведет к уменьшению значения поверхностных растягивающих напряжений.

## Практическая значимость работы

Основные результаты диссертационного исследования представляют значительный практический интерес для современного отечественного авиадвигателестроения.

Установлена взаимосвязь влияния технологических параметров (температуры обработки) ионного азотирования в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде и в тлеющем разряде на формирование остаточных напряжений в поверхностном слое титанового сплава ВТ6.

Предложен способ низкотемпературного ионного азотирования изделий из титановых сплавов, включающий подачу в вакуумную камеру плазмообразующей газовой смеси, содержащей 15 мас. % азота и 85 мас. % аргона. Процесс азотирования проводят в тлеющем разряде при температуре 450°C с постоянной прокачкой газовой смеси при давлении 150 Па.

Апробирован неразрушающий метод определения поверхностных остаточных напряжений методом свободных колебаний, основанный на зависимости упругих свойств материалов от их напряженного состояния, суть которого заключается в ударном возбуждении свободно затухающих упругих колебаний в контролируемом объекте и анализе характеристик собственных колебаний объекта.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.** Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивалась обоснованными допущениями, использованием апробированных методик исследований, результатами апробации на научных конференциях различного уровня. Все поставленные в диссертационной работе задачи последовательно решены в главах диссертации. Каждой поставленной задаче в заключении соответствует полученный результат, по каждому полученному результату сделан вывод.

Работа написана грамотным техническим языком, хорошо иллюстрирована. Материал диссертации исчерпывающе опубликован и

апробирован. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, из них 3 в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 2 работы опубликованы в журналах, входящих в базу цитирования Scopus и Web of Science, получено 3 патента РФ.

Автореферат в полной мере отражает основные положения диссертации и выводы по результатам исследований. Объем автореферата соответствует предъявляемым требованиям согласно ГОСТ Р 7.0.11-2011.

По содержанию и представлению материала **имеются следующие замечания:**

1. В разделе 2.1 указано, что в работе использовались образцы двух видов из титанового сплава ВТ6. Вместе с тем, в разделе 3.1 отмечено, что исследования проводились на образцах в отожженном состоянии без указания автором режимов термической обработки. На наш взгляд, всю информацию по исследуемым образцам, включая материал, виды термической обработки и ее режимы, автору следовало указать в разделе 2.1. Также в данном разделе следовало привести информацию о режимах низкотемпературного ионного азотирования в тлеющем разряде и в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде, исследуемых в настоящей работе.

2. В разделе 3 на стр. 60 приведено описание внешнего вида образцов после низкотемпературного ионного азотирования при разных давлениях и температурах, при этом иллюстрации к описанию отсутствуют. Далее автор, на основе анализа внешнего вида образцов, делает вывод о наиболее привлекательном режиме обработки, поэтому, считаем, что наглядный материал существенно дополнил бы выкладки автора.

3. Раздел 4.1 содержит описание методов определения остаточных напряжений и на наш взгляд должен располагаться в разделе 2.2. В разделе 4.2 приведены исследования поверхностных остаточных напряжений по методу Давиденкова, однако не указаны подробности эксперимента: толщина образцов, марка кислотостойкой краски, оборудование и состав для химического травления.

4. В разделе 5.2 не представлена в полной мере технологическая документация на разрабатываемый технологический процесс низкотемпературного ионного азотирования в плазме тлеющего разряда.

5. Имеются отдельные опечатки и неточности по тексту. В частности, на стр. 74 имеется опечатка в анализе зависимости рис. 3.16: значение поверхностной микротвердости материала плавно снижается (а не увеличивается как в тексте) от поверхности к сердцевине без резких переходов.

6. На наш взгляд представляет интерес анализ данных, представленных в совокупности на рис. 3.5, 3.7, 3.9 и 3.12, демонстрирующих увеличение интенсивности пиков  $\beta$ -Ti, значительное повышение микротвердости и глубины поверхностного слоя при ионном азотировании в плазме несамостоятельного сильнотоочного дугового разряда при температуре 600 °С. Данное замечание следует рассматривать как пожелание автору проведения дальнейших научных исследований по этому вопросу.

Сделанные замечания не снижают научной и практической ценности диссертации и общей высокой оценки работы.

### **Заключение**

Диссертационная работа Тагирова Айнура Фиргатовича выполнена на высоком научно-техническом уровне, представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены научно-обоснованные технологические решения по низкотемпературному ионному азотированию поверхностного слоя сложнопрофильных деталей из сплава ВТ6, обеспечивающих их высокие механические характеристики за счет формирования сжимающих напряжений в азотированном слое с повышенной твердостью. Реализация работы подтверждена актом об использовании результатов диссертационной работы в НПА «Технопарк АТ».

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа соответствует комплексу требований п.п. 9-16 «Положения о присуждении ученых степеней»

Постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор, Тагиров Айнуур Фиргатович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Официальный оппонент:

Асланян Ирина Рудиковна, профессор кафедры «Технология производства двигателей летательных аппаратов» ФГБОУ ВО МАИ,  
доктор технических наук (05.02.04 – Трение износ в машинах), доцент



Асланян Ирина Рудиковна

«5» ноября 2024 г.

ФГБОУ ВО «Московский авиационных институт (национальный исследовательский университет)» (ФГБОУ ВО МАИ).

125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

Тел.: +79773988089

Эл. адрес: as-irina@rambler.ru

Сведения об Асланян Ирине Рудиковне подтверждаю.

Заместитель начальника управления

по работе с персоналом

(должность)

(подпись)

М.П.

Иванов М.А

(Ф.И.О.)

