

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и  
инновационной деятельности  
ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ»  
им. А.Н. Туполева,  
доктор технических наук, доцент  
В.М. Бабушкин

*30 октября 2024г*

## ОТЗЫВ

### Ведущей организации на диссертационную работу

Тагирова Айнура Фиргатовича на тему «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 работы

Титановые сплавы занимают важное место среди современных конструкционных материалов благодаря удачному сочетанию физических, механических и технологических свойств. В газотурбинных двигателях титановые сплавы нашли широкое применение в изготовлении лопаток компрессора 1...4 ступеней. В условиях длительной эксплуатации разрушение лопаток, как правило, начинается либо с поверхности, либо в тонком поверхностном слое, который формируется на окончательных этапах обработки. Остаточные напряжения в поверхностном слое оказывают значительное влияние на сопротивление усталости деталей, работающих в условиях статических и знакопеременных нагрузок. Формирование сжимающих остаточных напряжений на поверхности решается различными отделочно-упрочняющими методами. В авиадвигателестроении наиболее широкое применение нашли

методы поверхностно-пластического деформирования (ППД). Также известны способы модифицирования поверхности лопаток, в частности, применение ионной имплантации с целью формирования сжимающих остаточных напряжений и увеличения усталостной прочности деталей. Применение вышеуказанных технологий к сложнопрофильным деталям, типа моноколесо, блиски, представляется технологически трудноосуществимой задачей, поскольку имеются сложности равномерной обработки затененных областей, а в случае ППД еще и изменение геометрических параметров детали.

В этой связи диссертационная работа Тагирова А.Ф., направленная на исследование низкотемпературного ионного азотирования титанового сплава ВТ6 и применение данной технологии к сложнопрофильным деталям с целью сохранения высокого уровня механических свойств материала, равномерной обработки поверхности, формирования на поверхности остаточных напряжений сжатия и повышения усталостной прочности, представляет несомненную актуальность как с научной, так и с практической точки зрения.

### **Общая характеристика работы**

Достоинством диссертационной работы Тагирова А.Ф. является то, что автору удалось подробно исследовать влияние технологических параметров низкотемпературного ионного азотирования в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде и в тлеющем разряде, в частности, температуры азотирования на формирование остаточных напряжений в поверхностном слое титанового сплава ВТ6. В работе использовались различные методы измерения поверхностных остаточных напряжений, в том числе, апробирован неразрушающий экспресс-метод определения поверхностных остаточных напряжений методом свободных колебаний, основанный на зависимости упругих свойств материалов от их напряженного состояния.

Практическая значимость работы включает разработанные технологические режимы низкотемпературного ионного азотирования для сложнопрофильных деталей. Немаловажно, что разработанные автором рекомендации прошли успешную апробацию на НПА «Технопарк АТ» (г. Уфа)

при реализации технологии низкотемпературного ионного азотирования сложнопрофильных деталей типа «моноколесо» из титанового сплава ВТ6.

### **Наиболее важные полученные результаты**

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

1. 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  $Ti_xN_y$ .

2. 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.

3. 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.

4. Проведена апробация технологии низкотемпературного ионного азотирования на сложнопрофильной детали типа имитатора моноколеса ГТД, имеющей теневые зоны.

### **Соответствие диссертации паспорту специальности**

Анализ цели и задач диссертации, методов и методик их решения, полученных экспериментальных результатов и научных закономерностей и предложенных теоретических обоснований, а также сформулированных выводов и практических рекомендаций позволяет заключить, что диссертация Тагирова Айнура Фиргатовича «Влияние режимов низкотемпературного ионного азотирования на механические характеристики поверхностного слоя сложнопрофильных деталей из сплава ВТ6» соответствует паспорту



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.»

- 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.»

- 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.»

- 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.»

#### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных в диссертационной работе научных результатов подтверждается применением современных методов исследования. Структурные исследования проведены методами растровой электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа и рентгеновской фотоэлектронной

спектрометрии. Механические свойства поверхности оценивали по результатам общепринятых стандартизованных методик.

### **Замечания**

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

1. При описании экспериментальных установок на основе тлеющего разряда и дугового разряда не указаны основные электрофизические характеристики, при которых проводилось азотирование, не указано, какие режимы были оптимальными.

2. Также возникает вопрос по влиянию примесей воздуха, в частности кислорода, на процессы азотирования. Поскольку вакуумная система включала в себя только форвакуумный пластинчато-роторный насос, то максимальная откачка могла быть до  $\sim$  сотых долей Торр, при этом известно, что малые примеси кислорода могут значительно изменить характеристики разряда.

3. Из каких соображений в работе рассматривались два варианта ионного азотирования?

4. В работе указано, что проведены усталостные испытания. Предел выносливости образцов лопаток составил 400-420 МПа. Однако из текста диссертационной работы не ясно, каким должно быть значение предела выносливости?

5. Из текста автореферата не ясно, какой интервал сжимающих напряжений является допустимым для деталей, в частности для сложнопрофильных деталей типа моноколесо, блиски?

6. В работе присутствуют опечатки и грамматические ошибки, хотя и не так часто.

### **Заключение**

Представленная диссертационная работа Тагирова А.Ф. выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную научно-квалифицированную работу, в которой изложены закономерности влияния режимов низкотемпературного ионного азотирования поверхности

титанового сплава ВТ6 на структурно-фазовые и механические характеристики поверхностного слоя.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на 5 научно-технических конференциях, опубликованы 12 научных работах, из них 3 – в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, 2 – в зарубежных научных изданиях, индексируемых в Web of Science или Scopus.

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 ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013г. №842 (с последующими изменениями), в которой содержатся новые научно-технические и технологические решения, а ее автор Тагиров Айнур Фиргатович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Отзыв обсужден и одобрен на заседании кафедры общей физики Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева – КАИ, протокол № 14 от 28 октября 2024 года

Отзыв составили:

И.о. заведующего кафедрой общей физики,  
профессор, д.ф.-м.н.

Сайфутдинов А.И.

Профессор кафедры общей физики,  
Д.ф.-м.н.

Тимеркаев Б.А.

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Адрес: 420111 г. Казань, ул. К. Маркса, 10,  
+7 (843) 231-02-23, email: [AISayfutdinov@kai.ru](mailto:AISayfutdinov@kai.ru), [BATimerkaev@kai.ru](mailto:BATimerkaev@kai.ru)

Подпись

завещаю. Начальник управления  
делопроизводства и контроля

 

