

## ОТЗЫВ

официально о оппонента на диссертацию

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 диссертации.**

Титановые сплавы широко применяются в авиастроении в частности в газотурбинных двигателях при изготовлении лопаток компрессора. При длительной эксплуатации в условиях статических и знакопеременных нагрузок поверхность лопаток подвержена интенсивному разрушению. Определяющим фактором увеличения усталостной прочности деталей является формирование на их поверхности сжимающих напряжений. Наиболее используемые в авиадвигателестроении методы поверхностно-пластического деформирования, обеспечивающие формирование сжимающих напряжений не применимы к деталям сложного профиля в виду сложности равномерной обработки. Применение низкотемпературного азотирования в целях упрочнения сложнопрофильных деталей за счет формирования сжимающих напряжений на их поверхности является актуальной задачей.

### **Содержание работы.**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов по результатам работы, списка использованных источников и приложений.

**Во введении** обосновывается актуальность и научная новизна исследований, проводимых в рамках диссертационной работы, формулируется цель и задачи, решению которых посвящена работа.

**Первая глава** является обзорной и представляет собой анализ исследований по тематике диссертации. На основе литературного анализа сформулированы и обоснованы задачи исследований.

**Второй глава** посвящена методике и технике проведения исследований. В ней представлено описание использованного экспериментального оборудования и методов исследования свойств и параметров поверхностного слоя образцов.

**В третьей** главе представлены результаты рентгеноструктурного анализа и микротвердость поверхностного слоя титанового сплава ВТ6 после ионного азотирования в плазме тлеющего разряда и несамостоятельного сильноточного дугового разряда.

**В четвертой** главе приведены результаты нескольких независимых исследований влияния низкотемпературного ионного азотирования на поверхностные остаточные напряжения.

**В пятой** главе представлены результаты ионного азотирования имитатора сектора моноколеса компрессора газотурбинного двигателя.

**В выводах** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Среди результатов, обладающих **научной новизной**, отметим следующие.

Низкотемпературное ионное азотирование при температурах ниже 500°C приводит к образованию  $\alpha$ -раствора азота в поверхностном слое титанового сплава ВТ6, свыше указанного значения приводит к образованию нитридов титана в структуре сплава с различным стехиометрическим составом  $Ti_xNy$ .

Азотирование поверхности образцов и деталей компрессора из сплава ВТ6 в плазме тлеющего разряда обеспечивает формирование сжимающих напряжений на поверхности.

Уменьшение температуры азотирования с 600°C до 450°C приводит к росту величины такого рода напряжений.

Азотирование образцов и деталей компрессора из сплава ВТ6 в плазме несамостоятельного сильноточного дугового разряда приводит к возникновению растягивающих напряжений. Снижение температуры азотирования с 600 °С до 450 °С способствует уменьшению значения поверхностных растягивающих напряжений.

Проведена апробация технологии низкотемпературного ионного азотирования на сложнопрофильной детали типа имитатора моноколеса ГТД.

#### **Научная и практическая значимость.**

Установлена взаимосвязь температуры обработки с формированием остаточных напряжений в поверхностном слое титанового сплава ВТ6.

Предложен способ низкотемпературного ионного азотирования изделий из титановых сплавов с повышенным содержанием аргона в газовой смеси и температуре 450 °С.

Апробирован неразрушающий метод определения поверхностных остаточных напряжений методом свободных колебаний.

Экспериментальные результаты работы могут быть использованы при разработке новых технологических процессов низкотемпературного ионного азотирования сложнопрофильных деталей.

#### **Замечания по диссертационной работе.**

1. В обзоре литературы представлено всего два метода ионного азотирования. Данные методы автор использовал для модификации образцов и сектора имитатора моноколеса. Однако существует множество других методов ионного азотирования заслуживающих внимания. Например, довольно специфический метод ионного азотирования в плазме электронного пучка (EBPN-технология) или близкий метод к азотированию в тлеющем разряде, но лишенный недостатка перегрева острых кромок деталей, так называемый «active screen plasma nitriding» (ASPN-технология).

2. В работе для определения фазового состава поверхностного модифицированного слоя образцов использовали метод рентгеноструктурного анализа с фокусировкой гониометра по Бреггу-Брентано. В этом случае анализируется не только приповерхностные слои, но и значительная не модифицированная часть образца. Для исследований фазового состава тонких модифицированных слоев предпочтительней было бы использовать электронную дифрактометрию, позволяющую получить информацию о структуре и составе вещества в небольшой локальной области поперечного шлифа. Либо осуществлять так называемые малоугловые съемки поверхности в скользящей геометрии пучка.

3. Основным инструментом, генерирующим плазму несамостоятельного сильноточного дугового разряда в объеме вакуумной камеры, является плазмогенератор ПИНК. Без подробной схемы данного источника с подключением источников питания проблематично понять принцип работы источника даже с кратким его описанием.

4. В тексте автореферата и диссертационной работы отсутствует информация о величине напряжения горения тлеющего разряда и о потенциале смещения образцов, азотированных в плазме несамостоятельного сильноточного дугового разряда. Также отсутствует информация о плотностях ионного тока на образцы и за счет чего (тока или напряжения горения) увеличивалась температура обрабатываемых образцов в тлеющем разряде. Принимая во внимания то, что содержание аргона в рабочей смеси подавляющее процесс ионного травления при низких давлениях и температурах процесса обработки может быть доминирующим над процессом диффузии азота либо существенно его ослаблять. А усиление электрического поля на острых кромках как образцов, так и лопаток имитатора моноколеса только усиливает его. Подтверждением данного предположения может служить увеличение шероховатости поверхностей при увеличении температуры

процесса обработки. К сожалению, автором таких данных предоставлено не было и возможность оценить вклад того или иного процесса отсутствует.

5. По тексту диссертационной работы имеются недочеты:

- рисунок 1.1 – нет разницы в условиях эксперимента между рисунками б и в;
- нет ссылки по тексту на рисунок 3.7 или 3.8, рисунок 3.8 отсутствует;
- таблица 1.1 – обозначения единиц измерения величин на латинице;
- таблица 1.3 – отсутствует;
- стр. 16-17 – давление в Мпа;
- стр. 27 – странный набор цифр 2728386294127 и 8283.

Приведенные замечания не снижают значимость полученных в диссертационной работе научных результатов.

Диссертационная работа Тагирова А.Ф. является законченным научным исследованием, выполненным на актуальную тему на высоком методическом уровне. Автореферат отражает содержание диссертации. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе – 3 статьи в научных журналах из перечня ВАК, 2 статьи в журналах библиографической базы Scopus и 3 патента. Получен акт от научно-производственной ассоциации «Технопарк Авиационных Технологий» об использовании результатов работы по повышению усталостной прочности имитатора сектора моноколеса компрессора ГТД из сплава ВТ6. По уровню решаемых задач, научной новизне, практической значимости, объему полученных результатов диссертационная работа «Влияние режимов низкотемпературного ионного азотирования на механические характеристики поверхностного слоя сложнопрофильных деталей из сплава ВТ6» соответствует критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (ред. от 26.10.2023) и удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям (Положение о порядке присуждения ученых степеней), а сам диссертант заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Официальный оппонент,

к.т.н., доцент, старший научный сотрудник ФГАОУ ВО  
«Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, Тел.: (3822) 41-33-69  
e-mail: [tyunkov84@mail.ru](mailto:tyunkov84@mail.ru)



Тюньков Андрей Владимирович

«24» октябрь 2024 г.

Подпись Тюнькова Андрея Владимировича заверяю

Ученый секретарь совета университета



Прокопчук Елена Викторовна

«24» октябрь 2024 г.