

На правах рукописи



ТАГИРОВ АЙНУР ФИРГАТОВИЧ

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ИОННОГО
АЗОТИРОВАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ
ИЗ СПЛАВА ВТ6**

Специальность

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2024 г.

Работа выполнена на кафедре «Технология машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»

Научный руководитель: - кандидат технических наук, доцент
Агзамов Рашид Денисламович

Официальные оппоненты: - **Асланян Ирина Рудиковна**
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», профессор
- **Тюньков Андрей Владимирович**
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, старший научный сотрудник

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н Туполева-КАИ»

Защита диссертации состоится «05» декабря 2024 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.04 (Д 212.125.15) в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 121552, г. Москва, ул. Оршанская, д. 3. ауд. 307Б. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета Скворцовой Светлане Владимировне и по электронной почте skvortsovasv@mai.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте: https://mai.ru/upload/iblock/c58/anqlpj739pl3o9njnawxawgohiflvq9d/Dissertatsiya_Tagirov.pdf

Ученый секретарь
диссертационного совета



Скворцова С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Титановые сплавы занимают важное место среди современных конструкционных материалов благодаря удачному сочетанию физических, механических и технологических свойств. В газотурбинных двигателях (ГТД) 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 настоящее время, как за рубежом, так и в нашей стране активно ведутся работы по изучению низкотемпературного ионного азотирования (450...600°C) титановых сплавов, при котором сохраняется сформированная исходная структура. Однако вопрос влияния низкотемпературного ионного азотирования на формирование поверхностных остаточных напряжений и повышение усталостной прочности деталей недостаточно изучен.

Таким образом, применение низкотемпературного ионного азотирования к сложнопрофильным деталям, типа моноколесо ГТД, с целью сохранения высокого уровня механических свойств материала, равномерной обработки поверхности лопаток, формирования на поверхности остаточных напряжений сжатия и повышения усталостной прочности, является актуальной задачей.

Цель работы: установить закономерности влияния режимов низкотемпературного ионного азотирования поверхности титанового сплава ВТ6 на структурно-фазовые и механические характеристики поверхностного

слоя и разработка технологии модифицирования поверхности сложнопрофильных деталей.

В диссертационной работе были поставлены и решены следующие задачи:

1. Определить влияние технологических параметров низкотемпературного ионного азотирования в тлеющем разряде и в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде на структуру, фазовый состав, микротвердость поверхностного слоя титанового сплава ВТ6.

2. Определить влияние технологических параметров низкотемпературного ионного азотирования на знак и величину остаточных напряжений, их распределение по глубине в поверхностном слое титанового сплава ВТ6.

3. Исследовать влияние низкотемпературного ионного азотирования в тлеющем разряде и в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде на усталостную прочность деталей из титанового сплава ВТ6.

4. Разработать опытную технологию низкотемпературного ионного азотирования сложнопрофильных деталей из конструктивных титановых сплавов, обеспечивающую равномерное формирование остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое и методику их неразрушающего контроля.

Научная новизна работы:

1. Показано, что ионное азотирование при температурах 450-500°C приводит к образованию α -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.

Практическая и теоретическая значимость работы:

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

2. 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. Этот способ отличается тем, что азотирование проводят в тлеющем разряде при температуре 450°C с постоянной прокачкой газовой смеси и поддержанием в ней давления 150 Па.

3. 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.

4. Экспериментальные результаты по исследованию влияния технологических режимов ионного азотирования на формирование в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия и методика их контроля могут быть использованы при разработке новых технологических процессов низкотемпературного ионного азотирования сложнопрофильных деталей.

Положения, выносимые на защиту:

1. Закономерности влияния технологических параметров низкотемпературного ионного азотирования на микротвердость, структуру, фазовый и химический состав титанового сплава ВТ6.

2. закономерности влияния низкотемпературного ионного азотирования в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде и в тлеющем разряде на знак и величину остаточных напряжений в поверхностном слое титанового сплава ВТ6.

3. Рекомендации к технологии низкотемпературного ионного азотирования сложнопрофильных деталей, типа моноколесо, обеспечивающей формирование остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое деталей.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается применением современных методов исследования, использованием современного высокоточного оборудования и стандартизированных методик.

Апробация результатов.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались: на студенческих конференциях «Неделя науки» (Уфа, 2017-2021 гг.), на IX Всероссийской научно-технической конференции УМПО (Уфа, 2018 г.), на X Всероссийской научно-технической конференции УМПО (Уфа, 2018 г.), «6th International Congress Energy Fluxes and Radiation Effects» (Томск, 2018 г.), XLV Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения» (Москва, 2019 г.), Труды 30-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Вакуумная техника и технологии – 2023» (Санкт-Петербург), Третья Международная школа-конференция молодых ученых «Кайбышевские чтения» (Уфа, 2023 г.), GDPA 2023 (Уфа), 20-я Международная научно-техническая конференция «Быстрозакаленные материалы и покрытия» (Москва, 2023 г.), I Всероссийская весенняя школа-семинар молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники» (Уфа, 2024г.).

Работа выполнена в рамках государственного задания № FEUE-2023-0006 «Исследование физико-химических и механических процессов при формообразовании и упрочнении деталей для авиакосмической и транспортной техники».

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 12 работ: 3 из них – в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ; 2 – в журналах, входящих в базу цитирования Scopus и Web of Science. Опубликовано 3 патента РФ.

Личный вклад автора заключается в участии в постановке цели и задач на основе литературных данных, в планировании и проведении экспериментов, анализе полученных результатов, формулировании выводов, положений, научной новизны, а также в написании и оформлении публикаций по теме диссертации и выступлениях на научных конференциях.

Структура и объем работы.

Научно-квалификационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложений. Основной материал изложен на 128 страницах машинописного текста, содержит 47 иллюстрации, 8 таблиц, список литературы из 127 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, научная новизна, приведены основные положения и показана практическая ценность работы.

В первой главе проведен обзор литературных источников по существующим и актуальным в настоящее время отделочно-упрочняющим методам поверхности титановых сплавов. Анализ отечественной и зарубежной литературы показал, что активно ведутся работы по изучению низкотемпературного ионного азотирования титановых сплавов, с целью сохранения высокого уровня механических свойств основного материала и создания небольшого по протяженности модифицированного слоя. Кроме того, значительное число исследований в области низкотемпературного ионного азотирования носит эмпирический характер, не приводящий к фундаментальным обобщениям, позволяющим осуществлять прогнозирование изменения эксплуатационных характеристик деталей. Сформулирована цель и поставлены задачи.

Во второй главе рассмотрен объект и методы исследования. Объектом исследований являются технологии низкотемпературного ионно-плазменного модифицирования поверхности титановых сплавов. В качестве материала для исследования использовались образцы из титанового сплава ВТ6 в отожженном состоянии, которые представляли собой пластины ($80 \times 10 \times 1$ мм) и образцы в форме дисков ($d=20$ мм, $h=5$ мм).

Приведены методики и оборудование, которые применялись при проведении работ: методы оптической металлографии, измерения микротвердости, рентгенофазового анализа, рентгеновского фотоэлектронного спектрального анализа, фрактографических исследований, усталостные

испытания, измерения геометрических параметров, измерения поверхностных остаточных напряжений.

Низкотемпературное ионное азотирование проводили в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде (НСДР) и в тлеющем разряде (ТР).

Ионное азотирование в ТР проводили при следующих интервалах технологических параметров:

- температура: $T=450-600^{\circ}\text{C}$;

- длительность процесса: $t=1-3$ часа;

- давление в рабочей камере: $P=50-300$ Па (в качестве рабочей смеси использовали 15%N₂+85%Ar). Образцы азотировали с постоянной прокачкой газовой смеси.

Ионное азотирование в НСДР проводили при температурах $T=450-600^{\circ}\text{C}$ в течение $t=1$ часа и при давлении $P=0,3$ Па.

Апробацию технологии низкотемпературного ионного азотирования проводили на образцах лопаток из титанового сплава ВТ6, которые собирались в специальную оснастку в количестве 5 штук (рис. 1) для имитации сектора моноколеса ГТД.



Рисунок 1 – Имитатор сектора моноколеса

В третьей главе представлены результаты исследований влияния низкотемпературного ионного азотирования на структуру, фазовый состав, микротвердость поверхностного слоя титанового сплава ВТ6.

Результаты рентгеноструктурного исследования (рис. 2) показали, что после низкотемпературного ионного азотирования, как в НСДР, так и в ТР на поверхности титанового сплава ВТ6 формируется нитридная фаза.

На образцах, азотированных при температуре 450°C наблюдается уширение и смещение рефлексов α -Ti в сторону больших углов дифракции, что связано с увеличением периода решетки вышеуказанных фаз и образованием α -раствора азота. При температуре 500°C наблюдается формирование нитридных фаз. С ростом температуры выдержки содержание нитридов титана в структуре образцов увеличивается, что, в свою очередь, обуславливает рост микротвердости и глубины модифицированного слоя.

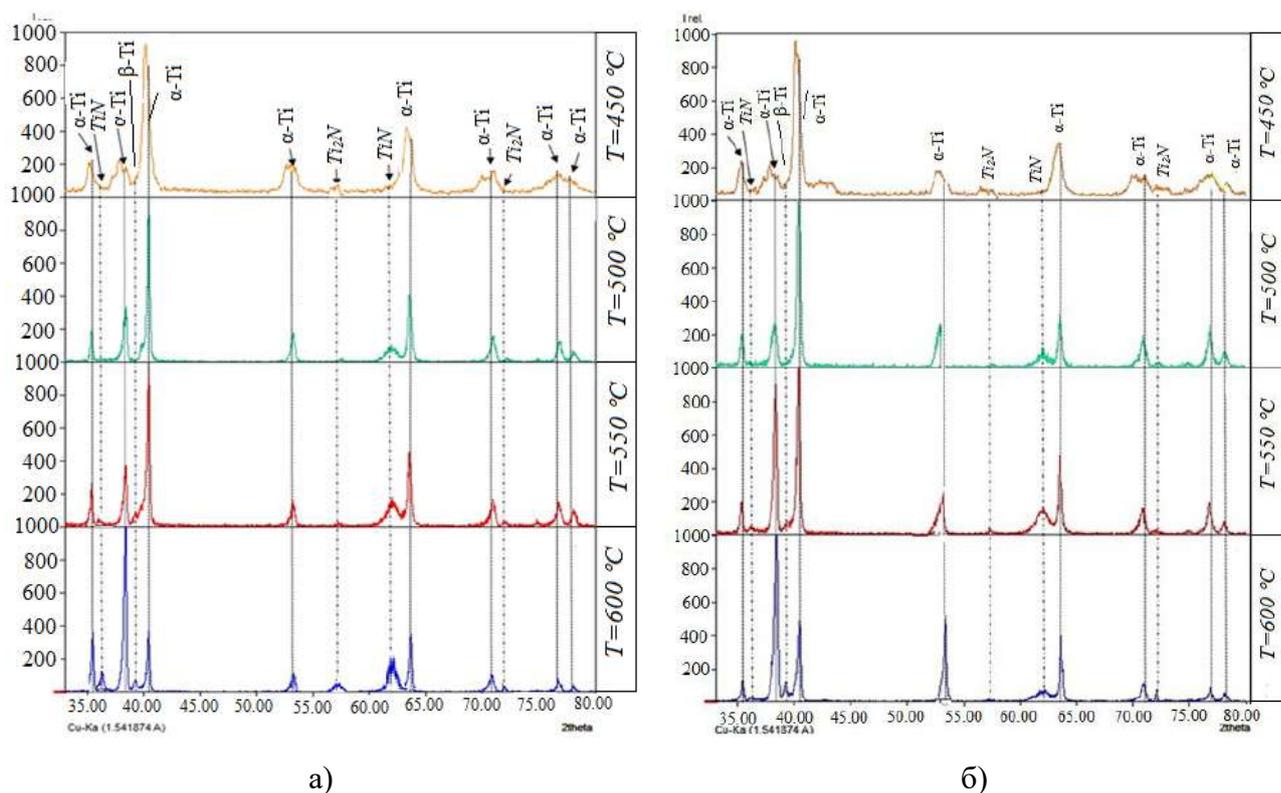


Рисунок 2 – Дифрактограмма сплава ВТ6 после азотирования: а) в НСДР; б) в ТР

На поверхности образцов, прошедших азотирование как в НСДР, так и в ТР при температурах 550-600°С наблюдается образование нитридных фаз следующего стехиометрического состава: TiN (111), TiN (220), Ti₂N (103), Ti₂N (116).

На спектрах образцов, азотированных как в НСДР, так и в ТР помимо пиков, соответствующих титану и основным легирующим элементам исследуемых сплавов, обнаружены пики, соответствующие азоту. После ионного азотирования при температуре 600°С на поверхности образцов обнаружены пики с химическим сдвигом, соответствующим бинарному соединению азота с титаном, что позволяет сделать вывод о наличии нитрида титана на поверхности. В процентном соотношении после ионного азотирования в НСДР как при 450°С, так и при 600°С количество азота больше, чем после обработки в ТР.

Высокая энергия бомбардировки во время процесса ионного азотирования в НСДР предполагают сложный диффузионный механизм, включающий формирование нитридов титана различной стехиометрии.

Таким образом, данные, полученные в результате исследования рентгеновских фотоэлектронных спектров, в сочетании с результатами рентгеноструктурного анализа дают более детальную картину.

Анализ зависимостей микротвердости показал, что после азотирования в НСДР в течение $t=1$ ч. (рис. 3а) при температуре 450°C глубина модифицированного слоя составила ~ 12 мкм, при 500°C ~ 14 мкм, при 550°C ~ 22 мкм, при 600°C ~ 32 мкм.

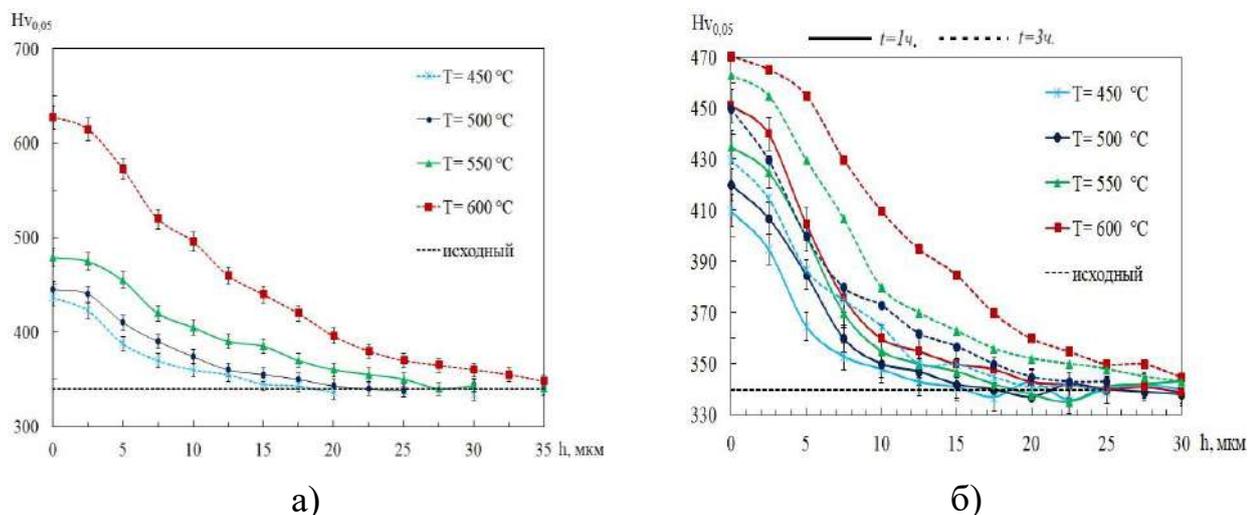


Рисунок 3 – Изменение микротвердости по глубине поверхностного слоя после ионного азотирования: а) в НСДР; б) в ТР

После азотирования в ТР в течение $t=1$ ч. (рис. 3б) при температуре 450°C глубина модифицированного слоя составила ~ 8 мкм, при 500°C ~ 10 мкм, при 550°C ~ 14 мкм, при 600°C ~ 18 мкм.

Увеличение длительности процесса ионного азотирования в тлеющем разряде с $t=1$ ч. до $t=3$ ч. приводит к полуторакратному росту модифицированного слоя.

Высокая энергия бомбардировки во время процесса ионного азотирования в НСДР значительно улучшает скорость диффузии за счет образования большого количества дефектов в поверхностных слоях, что приводит к увеличению глубины модифицированного слоя по сравнению с обработкой в ТР.

В четвертой главе приведены результаты исследования влияния низкотемпературного ионного азотирования на поверхностные остаточные напряжения (ПОН).

Замер поверхностных остаточных напряжений (ПОН) проводили тремя различными методами:

- 1) Рентгеноструктурный метод (основанный на измерении изменения расстояния между кристаллографическими плоскостями);
- 2) Механический разрушающий метод Н.Н. Давиденкова (основанный на измерении перемещений или деформаций образца при удалении поверхностных слоев).

3) Помимо указанных выше методов, в работе предложен *метод свободных колебаний* – метод неразрушающего контроля. Суть метода заключается в ударном возбуждении свободно затухающих упругих колебаний в контролируемом объекте и анализе амплитудно-частотной характеристики для дальнейшей интерпретации данных и связи с поверхностными остаточными напряжениями.

В таблице 1 представлены значения ПОН, полученные рентгеноструктурным методом, после низкотемпературного ионного азотирования.

После ионного азотирования в НСДР на поверхности образцов возникают растягивающие напряжения за счет образования большого количества дефектов во время интенсивной обработки и формирования нитридов титана в структуре сплава с различным стехиометрическим составом. Повышение температуры азотирования с 450°С до 600°С приводит к увеличению величины растягивающих напряжений.

Таблица 1. Значения остаточных напряжений на образцах

№ образцов	Температура обработки $T, ^\circ\text{C}$	Длительность $t, \text{ч}$	Значения ПОН $\sigma, \text{МПа}$
Исходный			+10±10
после обработки в НСДР			
1	450	1	+5±10
2	500	1	+48±10
3	550	1	+56±10
4	600	1	+122±10
после обработки в ТР			
5	450	1	-232±10
6	500	1	-193±10
7	550	1	-82±10
8	600	1	-81±10
9	450	3	-47±10
10	500	3	-14±10
11	550	3	-15±10
12	600	3	+77±10

После низкотемпературного ионного азотирования в ТР на поверхности образцов возникают сжимающие напряжения за счет образования фаз с увеличенным удельным объемом и α -раствора азота.

Увеличение температуры и длительности обработки приводит к увеличению количества азота на поверхности, образованию нитридов в структуре сплава и к уменьшению величины сжимающих ПОН.

На рис. 5 представлены эпюры остаточных напряжений, полученные рентгеноструктурным методом с послойным травлением. Для построения эпюр были выбраны крайние образцы.

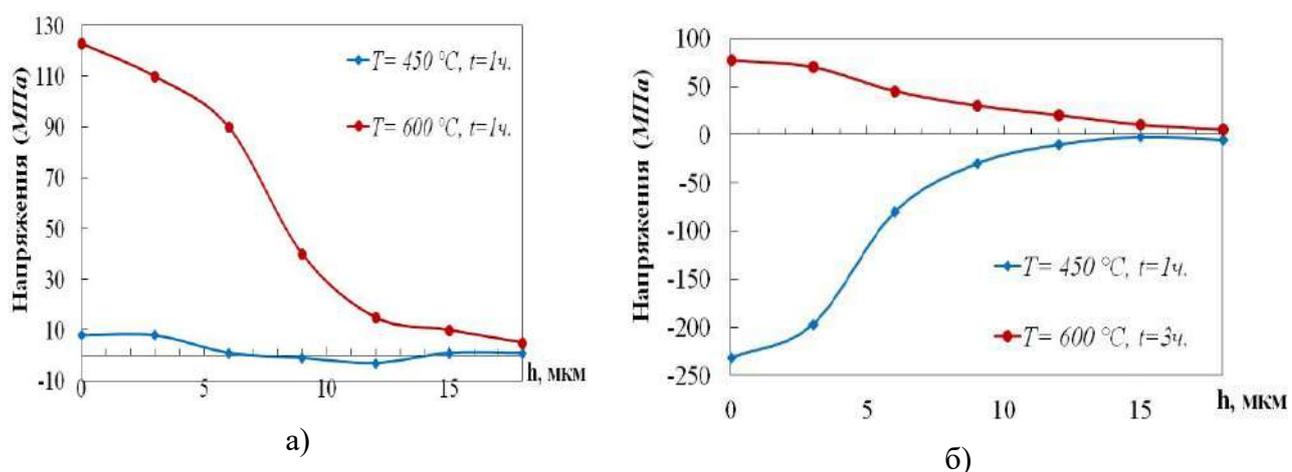


Рисунок 5 – Эпюры остаточных напряжений после ионного азотирования:
а) в НСДР; б) в ТР

По результатам, представленным на рис. 5 наблюдаются изменения ПОН по глубине поверхностного слоя образца из сплава ВТ6 как после ионного азотирования в НСДР, так и после обработки в ТР.

На рис. 6 представлены эпюры остаточных напряжений, полученные механическим разрушающим методом Н.Н. Давиденкова, после низкотемпературного ионного азотирования.

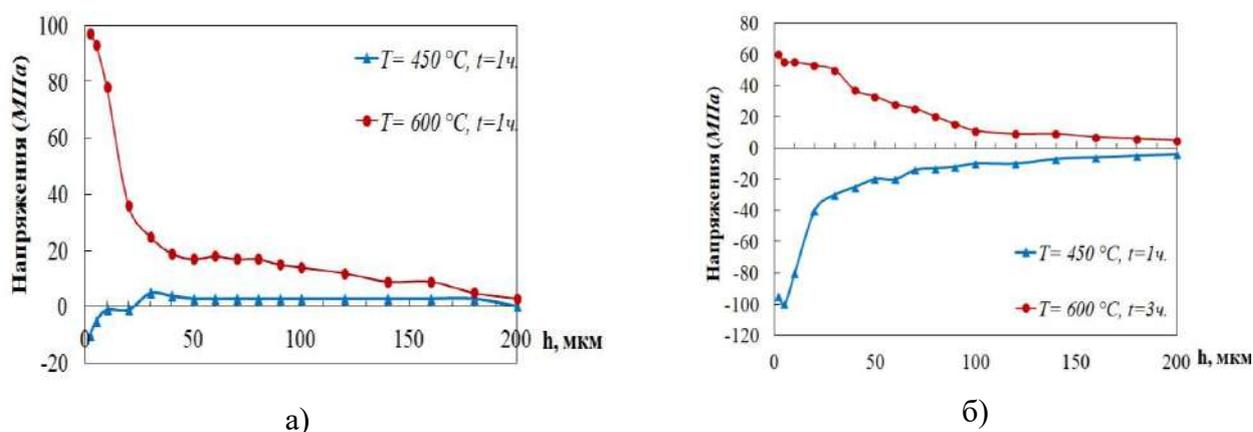


Рисунок 6 – Эпюра остаточных напряжений после ионного азотирования:
а) в НСДР; б) в ТР

По результатам, представленным на рис. 6а, видно, что после ионного азотирования в НСДР при 450°С в течение $t=1$ ч. формируются ПОН сжатия (или около нулевые). После обработки при температуре 600°С в течение $t=1$ ч. на поверхности образцов формируются растягивающие напряжения, которые распространяются до глубины ~ 70 мкм.

После ионного азотирования в ТР при 450°С в течение $t=1$ ч. на поверхности формируются ПОН сжатия (глубина залегания ~ 25 мкм), после азотирования при 600°С в течение $t=3$ ч. – растягивающие остаточные напряжения (глубина залегания $\sim 70-80$ мкм). Эффект смены знака остаточных напряжений при бóльших температурах связан с образованием нитридов в структуре сплава, удельный объем которых существенно меньше, чем альфа-раствора азота.

Для разработки способа неразрушающей оценки и определения взаимосвязи поверхностных остаточных напряжений и характера распределения звуковых волн использован предложенный метод свободных колебаний. На рис. 7 представлена зависимость величины относительного приращения частот от температуры ионного азотирования.

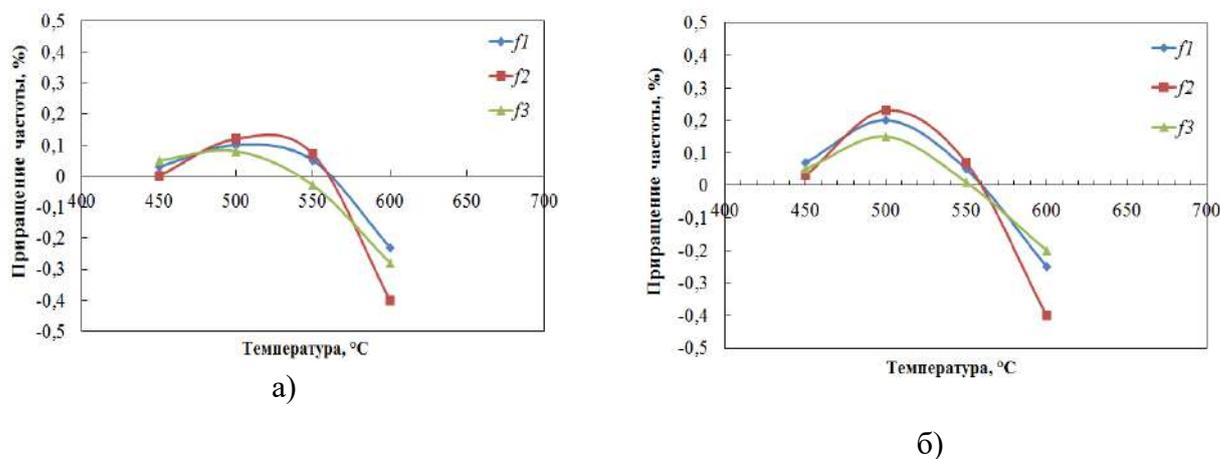


Рисунок 7 – Зависимость величины относительного приращения частот от температуры азотирования с выдержкой: а) $t=1$ ч. час; б) $t=3$ ч.

Азотирование при температурах 450 и 500°С приводит к положительному приращению частот. При подходе к температуре 550°С монотонность зависимости нарушается и при 600°С наблюдается отрицательный эффект. Увеличение времени азотирования до трех часов усиливает эффект повышения частот на восходящей стадии, а повторение полученной закономерности доказывает ее физическую объективность.

Повышение частот свободных колебаний можно ассоциировать с возникновением, в результате ионного азотирования, остаточных напряжений

сжатия на поверхности образцов. Напротив, поверхностные остаточные напряжения растяжения сжимают образец, вызывая снижение частот свободных колебаний. Таким образом, в области температуры 550°C происходит смена знака остаточных напряжений, несмотря на монотонную зависимость микротвердости.

В пятой главе представлены результаты апробации низкотемпературного ионного азотирования на имитаторе сектора моноколеса.

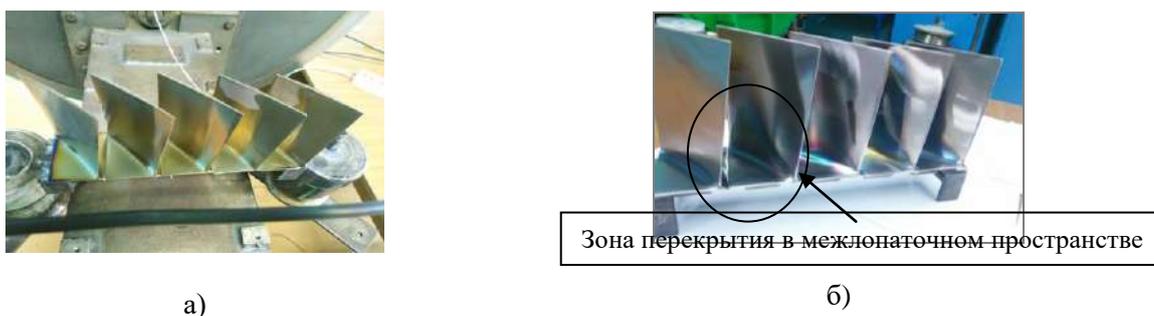


Рисунок 8 – Имитатор сектора моноколеса

Исходя из проведенных исследований на образцах, в частности, полученных результатов по остаточным напряжениям, выбран режим для ионного азотирования сектора моноколеса ($T=450^{\circ}\text{C}$; $t=1\text{час}$).

Анализ внешнего вида имитатора сектора моноколеса после ионного азотирования в плазме ТР (рис. 8а) показал, что после обработки лопатки приобрели равномерный золотистый цвет. После ионного азотирования в НСДР (рис. 8б) на имитаторе моноколеса выявлены цвета побежалости. Данный эффект объясняется тем, что при азотировании в НСДР между лопатками создается зона перекрытия (ЗП), препятствующая проникновению ионов из плазмы к поверхности детали. В области ЗП электроны попадают в ловушку и усиленно осциллируют, в результате чего происходит интенсификация ионизации и локальное повышение температуры.

После низкотемпературного ионного азотирования на образцах был произведен замер поверхностных остаточных напряжений рентгеноструктурным методом (таблица 3).

Таблица 3. Значения ПОН после ионного азотирования

Вид обработки	Значения ПОН, σ (МПа)		
	вх. кромка	σ_{max}	вых. кромка
ИА в НСДР ($T=450^{\circ}\text{C}$; $t=1\text{ч.}$)	+1	-11	-30
ИА в ТР ($T=450^{\circ}\text{C}$; $t=1\text{ч.}$)	-191	-196	-194

После ионного азотирования в НСДР на поверхности образцов лопаток наблюдается разброс значений ПОН на кромках и в центральной части образцов лопаток. Полученные результаты можно связать с тем, что в процессе азотирования в НСДР происходит неравномерный нагрев поверхности лопаток, и тем самым это влияет на формирование неудовлетворительных поверхностных остаточных напряжений.

После низкотемпературного ионного азотирования в ТР на поверхности образцов лопаток сформировались сжимающие напряжения величиной ~200 МПа (разброса значений ПОН не наблюдается).

Результаты усталостных испытаний (рис. 9) показали, что предел выносливости образцов лопаток, обработанных в НСДР, составляет 400 МПа, а в ТР – 420 МПа (на базе $2 \cdot 10^7$ циклов).

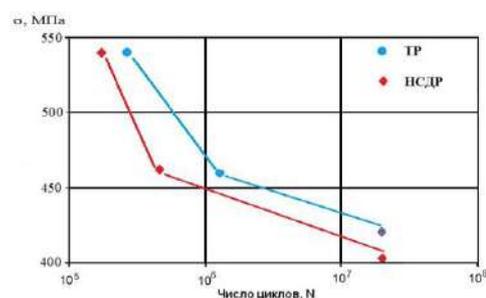


Рисунок 9 – Результаты усталостных испытаний на образцах лопаток из титанового сплава ВТ6

Из анализа результатов замеров геометрических параметров (рис. 10) следует, что после

низкотемпературного ионного азотирования при температуре $T=450^{\circ}\text{C}$ как в НСДР, так и в ТР геометрия образцов-лопаток не претерпела значительных изменений.

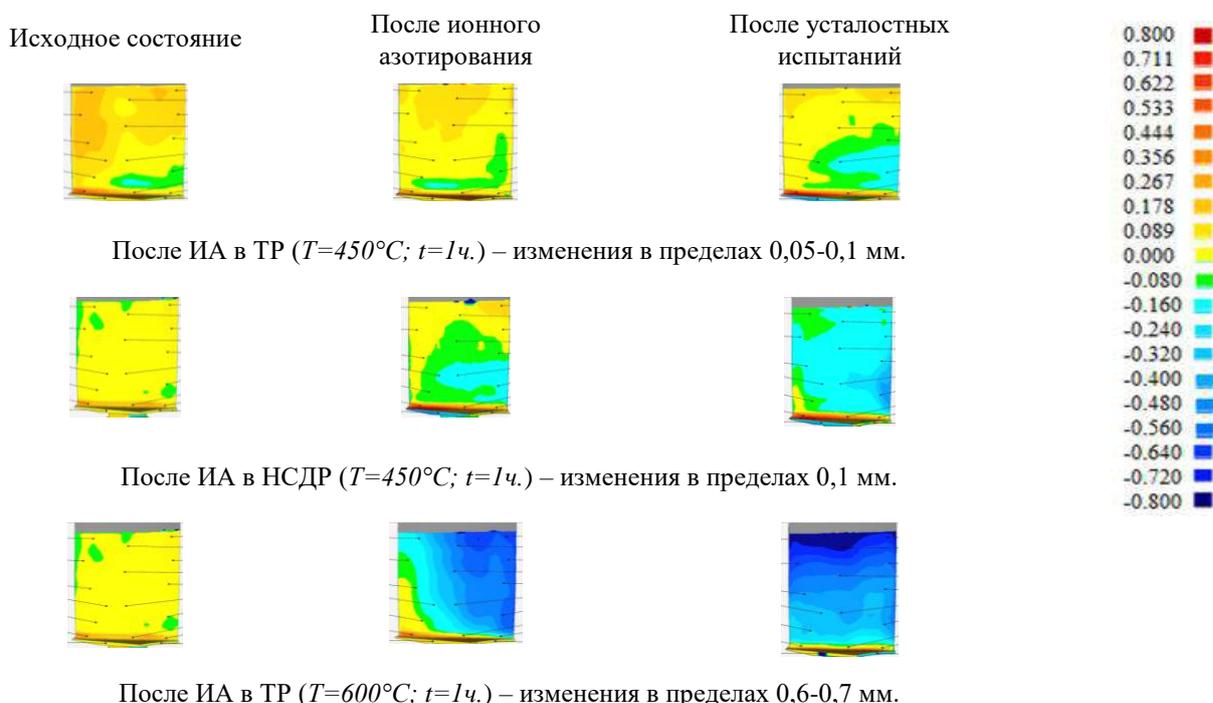


Рисунок 10 – Геометрические параметры образцов-лопаток

В качестве сравнительного эксперимента на образце-лопатке, обработанной в тлеющем разряде при температуре $T=600^{\circ}\text{C}$, наблюдались максимальные отклонения геометрических параметров, которые составили 0,6-0,7 мм.

Из полученных выше результатов видно, что процесс ионного азотирования в НСДР характеризуется определенной направленностью потока ионов, что усложняет обработку сложнопрофильных деталей. Наиболее целесообразным для обработки лопаток моноколес и блисков представляется процесс низкотемпературного ионного азотирования в ТР, ввиду погружения деталей в плазму и отсутствия дефектов внешнего вида в зоне перекрытия.

Для оценки влияния предварительной обработки и низкотемпературного ионного азотирования на формирование сжимающих остаточных напряжений проведены экспериментальные работы на усталостных образцах (рис. 11).

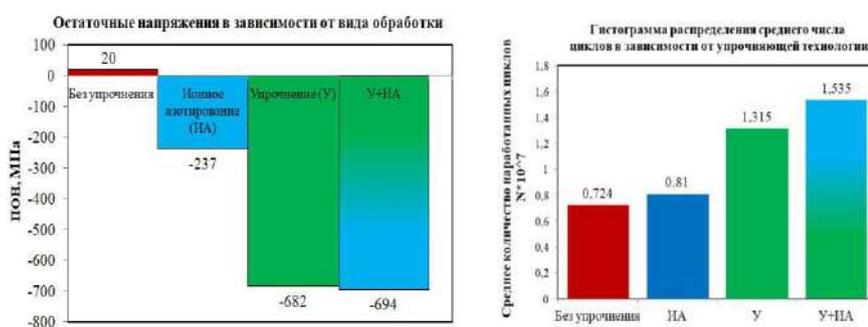


Рисунок 11 – Результаты замера ПОН и усталостных испытаний после различных методов обработки

Из представленных результатов видно, что после ионного азотирования сформировались сжимающие остаточные напряжения величиной -237 МПа, после упрочнения величина сжимающих напряжений составила -682 МПа, после комбинированной обработки – -694 МПа. Также необходимо отметить, что низкотемпературное ионное азотирование в тлеющем разряде по рекомендованной технологии не приводит к релаксации напряжений, наведенных предварительным упрочнением. После ионного азотирования величина усталостной прочности увеличилась на ~ 10%.

В рамках работы предложена и рекомендована к использованию НПА «Технопарк АТ» опытная технология низкотемпературного ионного азотирования имитатора моноколеса компрессора ГТД в тлеющем разряде из титанового сплава ВТ6, обеспечивающая формирование в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Показано, что увеличение температуры азотирования с 450 до 600°C приводит к увеличению глубины азотированного слоя с 8 до 30 мкм. Увеличение длительности ионного азотирования с $t=1ч.$ до $t=3ч.$ приводит к двукратному росту модифицированного слоя. Показано, что азотирование при температуре 450 и 550°C не приводит к изменению микроструктурных параметров образцов, а при температуре 600°C наблюдается укрупнение отдельных кристаллитов, обусловленное процессами рекристаллизации. Представлено, что после ионного низкотемпературного ионного азотирования как при 450°C, так и при 600°C на поверхности всех образцов помимо пиков интенсивности, соответствующих α - и β - фазам сплава ВТ6, также наблюдаются фазы на основе нитрида титана. При относительно низких температурах ($T=450-500^{\circ}C$) наблюдается смещение пиков интенсивности α -Ti, что свидетельствует о наличии альфа-раствора азота и формировании остаточных напряжений в поверхностном слое.

2. Установлено, что, несмотря на монотонную зависимость микротвердости, после низкотемпературного ионного азотирования формируются как сжимающие, так и растягивающие остаточные напряжения на поверхности образцов. Установлено, что на формирование остаточных напряжений в поверхностном слое существенное влияние оказывает температура обработки. Показано, что ионное азотирование в НСДР в интервале температур 450-600°C приводит к увеличению величины растягивающих напряжений с 48 до 122 МПа. На поверхности образцов, обработанных в ТР, возникают сжимающие напряжения. Причем уменьшение температуры и времени выдержки обработки приводит к росту величины сжимающих остаточных напряжений и составляет -232 МПа. Эффект смены знаков при температурах 550-600°C объясняется появлением нитридов в структуре, удельный объем которых меньше, чем альфа-раствора азота. Образование нитридов в структуре титановых сплавов приводит к стягиванию решетки и созданию в ней поверхностных остаточных напряжений растяжения.

3. Показано, что предел выносливости образцов лопаток, обработанных в НСДР, составляет 400 МПа, а в ТР – 420 МПа (на базе $2 \cdot 10^7$ циклов). Установлено, что после ионного азотирования в НСДР на поверхности образцов лопаток наблюдается разброс значений ПОН на кромках и в центральной части образцов лопаток в результате неравномерной обработки поверхности. После обработки в ТР разброса значений ПОН не наблюдается.

4. Разработана опытная технология низкотемпературного ионного азотирования сложнопрофильных деталей (имитатора моноколеса) из титанового сплава ВТ6, обеспечивающая формирование в поверхностном слое требуемой величины сжимающих остаточных напряжений. Представлена методика неразрушающего контроля поверхностных остаточных напряжений.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК РФ:

1. Хусаинов, Ю.Г. Повышение эффективности процесса ионного азотирования титанового сплава ВТ6 с крупно- и ультрамелкозернистыми структурами / Ю.Г. Хусаинов, Р.Д. Агзамов, А.А. Николаев, А.Ф. Тагиров // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2020. – Т. 16. – № 1 (181). – С. 29-33.

2. Тагиров, А.Ф. Низкотемпературное ионное азотирование титанового сплава ВТ6 в тлеющем разряде и в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде / А.Ф. Тагиров, Р.Д. Агзамов, А.А. Николаев // Титан. – 2021. – № 3 (72). – С. 41-47.

3. Тагиров, А.Ф. Апробация технологии низкотемпературного ионного азотирования имитатора моноколеса из титанового сплава ВТ6 / А.Ф. Тагиров, Р.Д. Агзамов, В.В. Астанин // Титан. – 2024. – № 2 (82). – С. 41-45.

Публикации в изданиях, входящих в наукометрические базы

Web of Science и Scopus:

4. Khusainov, Y.G. Influence of hydrogen content on ion nitriding of coarse-grained and ultrafine-grained VT6 titanium alloys / Y.G. Khusainov, A.A. Nikolaev, R.D. Agzamov, K.N. Ramazanov, A.F. Tagirov // Journal of Physics: Conference Series, 1393(1), 012095, 2019.

5. Agzamov, R.D. Effect of low-temperature ion nitriding on microhardness, roughness and residual stresses in the surface layer of Ti-6Al-4V / R.D. Agzamov, A.F. Tagirov, A.A. Nikolaev, K.N. Ramazanov // Journal of Physics: Conference Series, 1393(1), 012066, 2019.

Патенты:

6. Пат. №2633867 Российская Федерация. МПК С23С 8/36. Способ низкотемпературного ионного азотирования титановых сплавов / Будилов В.В., Рамазанов К.Н., Агзамов Р.Д., Тагиров А.Ф., Золотов И.В.; (РФ). - №2017100457, заявл. 09.01.2017, опубл. 18.10.2017.

7. Пат. №2687616 Российская Федерация. МПК С23С 8/36. Способ низкотемпературного ионного азотирования титановых сплавов с постоянной

прокачкой газовой смеси / Рамазанов К.Н., Агзамов Р.Д., Хусаинов Ю.Г., Николаев А.А., Тагиров А.Ф., Есипов Р.С., Варданян Э.Л.; (РФ) - №2018112729, заявл. 09.04.2018, опубл. 15.05.2019.

8. Пат. №2717124 Российская Федерация. МПК С23С 8/36. Способ интенсификации процесса низкотемпературного ионного азотирования изделий из титановых сплавов / Рамазанов К.Н., Хусаинов Ю.Г., Агзамов Р.Д., Николаев А.А., Тагиров А.Ф.; (РФ) - №2019136706, заявл. 14.11.2019, опубл. 18.03.2020.

Прочие публикации:

9. Agzamov, R.D. Low-temperature plasma nitriding of titanium alloy Ti-6Al-4V / R.D. Agzamov, K.N. Ramazanov, A.A. Nikolaev, A.F. Tagirov // Materials. Technologies. Design. – 2019. – Volume 1. – № 1. – P. 11-16.

10. Tagirov A.F. Low-temperature ion nitriding of titanium alloys / A.F. Tagirov, R.D. Agzamov // Materials. Technologies. Design. – 2023. – Volume 5. – № 3(13). – P. 71-78.

11. Тагиров, А.Ф. низкотемпературное ионное азотирование титанового сплава ВТ6 / А.Ф. Тагиров, Р.Д. Агзамов // Вакуумная техника и технологии – 2023. Труды 30-й Всероссийской научно технической конференции с международным участием, 2023. – 426с.

12. Тагиров, А.Ф. Проработка возможности применения низкотемпературного ионного азотирования к лопаткам из титанового сплава ВТ6 с целью повышения их эксплуатационных свойств / А.Ф. Тагиров, Р.Д. Агзамов // Быстрозакаленные материалы и покрытия. Материалы XX-й Международной научно-технической конференции, 2023. – 372с.