

На правах рукописи
УДК 621.785.53

РГБ ОА

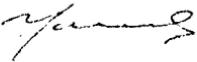
1 / АВГ 2001

ГРОМОВ ВАЛЕРИЙ ИГОРЕВИЧ

ВЛИЯНИЕ ИСХОДНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ
НА ПРОЦЕСС ИОННОЙ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ
ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ

Специальность 05.16.01 Металловедение и
термическая обработка
металлов

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Москва 2000 г.

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана на кафедре "Материаловедение".

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки и техники РФ, академик РАЕН, доктор технических наук, профессор Арзамасов Б.Н.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Карпман М.Г.

кандидат технических наук
Гришин В.И.

Ведущее предприятие: ОАО "А.Дилька-Сатурн" г. Москва

Защита состоится "31" мая 2000 г. на заседании диссертационного совета К 053.15.13 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью учреждения, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э.Баумана,

Автореферат разослан "25" апреля 2000 г.

Телефон для справок: 267-09-63.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук,
доцент

 Шубин И.Н.

Подписано к печати "20" 04 2000 г. Объём I п.л.

Тираж 100 экз. Заказ № 69г. Типография МГТУ им. Н.Э.Баумана

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Современная аэрокосмическая техника, многие отрасли машиностроения немислимы без применения новых конструкционных материалов среди которых ведущее место занимают титановые сплавы.

Уникальное сочетание физико-химических и механических свойств титановых сплавов открывает широкие перспективы их использования в самых современных отраслях промышленности. Однако, при всех бесспорных преимуществах титановых сплавов по сравнению с другими конструкционными материалами, сплавы титана имеют один существенный недостаток, который препятствует их широкому внедрению в повседневную практику машиностроения. Этим недостатком является их низкая износостойкость и способность к "схватыванию" трущихся поверхностей.

В настоящее время разработано довольно большое количество различных способов повышения износостойкости титановых сплавов, ведущим из которых является метод химико-термической обработки (насыщение поверхности деталей из титановых сплавов бором, углеродом, азотом или кислородом воздуха). Однако, существующие промышленные способы борирования, науглероживания, азотирования, альфирования (насыщение кислородом воздуха) титановых сплавов не лишены серьезных недостатков в плане получения качественных диффузионных слоев, экологически небезопасны, обладают низкой экономичностью. В этой связи всё большее внимание привлекает к себе способ ионной химико-термической обработки титановых сплавов. Этот процесс выгодно отличается от других способов химико-термической обработки тем, что, благодаря возможности управления процессом насыщения, ионная химико-термическая обработка позволяет получать на титановых сплавах диффузионные слои гарантируемого качества. Между тем, широкому применению указанного процесса в промышленности препятствует отсутствие рациональной промышленной технологии ионной химико-термической обработки титановых сплавов с целью повышения их износостойкости. Это связано с недостаточно полными исследованиями влияния различных технологических факторов процесса ионной химико-термической обработки (вид насыщающего компонента рабочей среды, температура процесса насыщения, время насыщения, давление и состав рабочей газовой среды) на структуру и свойства титановых сплавов.

В связи с вышеизложенным становится очевидным, что решение задачи повышения износостойкости титановых сплавов методом ионной химико-термической обработки имеет большое практическое значение и проведение данной работы весьма актуально.

Цель и задачи работы. На основании изучения влияния различных газовых сред на структуру и свойства деталей из титановых сплавов разработать способ ионной химико-термической обработки титановых сплавов для повышения их износостойкости.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- изучены особенности формирования диффузионного слоя и выявлено влияние различных технологических факторов ионного азотирования в азото-аргоновых, азото-гелиевых газовых средах, а также в средах азота особой чистоты, аргона и гелия, содержащих остаточный азот, на структуру и свойства титановых сплавов.

- изучены особенности формирования диффузионного слоя и выявлено влияние различных технологических факторов ионного альфирования титановых сплавов в аргоно-воздушных газовых средах на структуру и свойства диффузионных слоев.

- обоснован и выбран новый способ ионной химико-термической обработки титановых сплавов с целью повышения их износостойкости.

- разработаны технологические режимы ионного азотирования титановых сплавов с целью повышения их износостойкости в газовой среде гелия, содержащего оста-точный азот.

Научная новизна. В результате исследования различных способов ионной химико-термической обработки титановых сплавов определен состав азотосодержащей среды, обеспечивающей получение диффузионных слоев необходимого качества.

Научно обосновано использование гелия, содержащего до 0,002% азота, в качестве исходной газовой среды при ионном азотировании титановых сплавов. Указанное количество азота оказалось достаточным для образования азотированных слоев значительной толщины, что составляет основу разработки процесса ионной химико-термической обработки титановых сплавов для повышения их износостойкости.

Автор защищает:

1. Результаты экспериментальных исследований влияния режимов ионного азотирования и ионного альфирования в различных газовых средах на фазовый состав, структуру и свойства титановых сплавов.

2. Новые экспериментальные данные о влиянии состава газовой среды при ионной химико-термической обработке на износостойкость титановых сплавов.

3. Данные экспериментов, показывающие влияние на технологичность процесса ионного азотирования титановых сплавов вида газа разбавителя азота.

4. Рекомендации по применению разработанного способа ионной химико-термической обработки титановых сплавов с целью повышения их износостойкости - ионного азотирования в среде остаточного азота гелия.

Практическая ценность работы. Разработан новый способ ионного азотирования титановых сплавов с целью повышения их износостойкости. Проведение стендовых испытаний титановой зубчатой пары, прошедшей ионное азотирование по разработанному режиму по сравнению с титановой зубчатой парой, прошедшей серийную термическую обработку, показало увеличение износостойкости в несколько раз.

Внедрение в промышленность. Разработанный способ ионного азотирования планируется к внедрению на ФНПЦ «Салют» применительно к ряду деталей (корпуса клапанов, обоймы подшипников, деталей систем управления) серийно выпускаемого авиационного двигателя АИ-31ф.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы доложены на Всероссийской научно-технической конференции "Новые материалы и технологии" (г. Москва, 1997), на Всероссийской научно-технической конференции "Машиностроительные технологии" (г. Москва, 1998), экспонировались на Первом и Втором международном салоне "Наука-Машиностроение-Рынок" (ВВЦ, г.Москва, 1996, 1997).

Основные результаты исследований по данной тематике были представлены в работе "Разработка ресурсосберегающих технологий получения диффузионных покрытий в активизированных газовых средах", которая была отмечена Государственной премией Российской Федерации в области науки и техники для молодых учёных (1997 года (диплом №26).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 3 печатные работы и тезисы доклада на Всероссийской научно-технической конференции.

Объём работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Работа изложена на 127 страницах текста, содержит 29 рисунков, 13 таблиц, список литературы включает 81 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе на основании обзора отечественной и зарубежной технической литературы выявлены причины низкой износостойкости титановых сплавов и показаны пути её повышения.

Проведён критический анализ существующих технологических процессов повышения износостойкости сплавов титана. Показано, что применяемые в промышленности технологические процессы поверхностной пластической деформации, нанесения износостойких химических и гальванических покрытий, ионной имплантации, лазерного термоупрочнения, упрочнения поверхности титановых сплавов электроннолучевым методом, анодирования титановых сплавов не отвечает требованиям предъявляемым к рациональному процессу повышения износостойкости титановых сплавов.

Показано, что наиболее перспективным способом поверхностного упрочнения титановых сплавов с целью повышения их износостойкости является метод ионной химико-термической обработки. Указаны преимущества и особенности этого процесса. Среди основных преимуществ отмечается значительное ускорение процесса диффузионного насыщения и возможность достижения гарантированно высокого качества диффузионных слоёв за счёт хорошей управляемости процесса.

На основании проведенного анализа взаимодействия с титаном насыщающих компонентов рабочей газовой среды (азот, углерод, бор, кислород) сделан вывод о том, что наиболее перспективными с точки зрения построения рационального процесса обработки титановых сплавов с целью повышения их износостойкости являются процессы ионной химико-термической обработки в газовых средах на основе азота (ионное азотирование) и кислорода воздуха (ионное альфирование), где в качестве газа разбавителя насыщающих компонентов смеси необходимо использовать инертные газы.

К сожалению, проведенный анализ не может дать ответ какой же из возможных перспективных процессов ионной химико-термической обработки (ионное азотирование или ионное альфирование) является наиболее предпочтительным с точки зрения построения рационального

процесса повышения износостойкости титановых сплавов. Имеющиеся литературные данные по вопросу влияния режимов ионного азотирования на структуру и свойства титановых сплавов не полны и зачастую противоречивы. Сведения о ионном альфировании титановых сплавов в литературных источниках почти полностью отсутствуют.

На основании обзора литературных источников и проведенного анализа существующих сведений о ионной химико-термической обработке титановых сплавов сформулированы цель настоящей работы и задачи исследований.

Во второй главе рассмотрены вопросы проведения работы, дана характеристика исследуемых материалов, приведены описания методик исследований.

Исследования подвергались промышленные титановые сплавы различной легированности и различного фазового состава α сплавы (BT-5), псевдо α сплавы (BT-20), $\alpha + \beta$ сплавы (BT3-1, BT9). Перед ионной химико-термической обработкой образцы из указанных титановых сплавов подвергались серийной термической обработке (отжигу).

Процессы ионной химико-термической обработки проводились на опытно-промышленной установке совместной разработки МГТУ им. Н.Э.Баумана и ФНПЦ "Салют". Приведено техническое описание установки, её функциональная схема, порядок проведения процессов ионной химико-термической обработки. Отмечается, что данная установка позволяет проводить процессы ионного азотирования и ионного альфирования без переналадки установки.

Микроструктуру диффузионных слоев титановых сплавов после проведения процессов ионного азотирования и ионного альфирования изучали на специальном образце приготовленных поперечных шлифах с помощью горизонтального металлографического микроскопа МИМ-8.

Микротвердость азотированных и альфированных диффузионных слоев титановых сплавов измеряли на микротвердомере ПМТ-3 при различных нагрузках на индентер.

Фазовый состав диффузионных слоев титановых сплавов после проведения процессов ионного азотирования и ионного альфирования исследовали с помощью дифрактометра "ДРОН-3" с использованием кобальтового излучения. Испытания на износостойкость титановых образцов, подвергнутых ионной химико-термической обработке проводили на машине "Шкода-Савин", испытания на износостойкость зубчатых пар - на установке кафедры "Детали

машин" МГТУ им. Н.Э.Баумана. Методики и режимы испытаний на износостойкость приведены.

В третьей главе приведены результаты исследования влияния различных технологических факторов процесса ионной химико-термической обработки (температура процесса, вид насыщающего компонента, состав и давление рабочей газовой среды, продолжительность обработки) на структуру и свойства титановых сплавов.

Установлено, что оптимальной температурой процесса ионной химико-термической обработки титановых сплавов является температура равная 850 °С, обеспечивающая удовлетворительное сочетание структуры диффузионного слоя и сердцевины титановых сплавов.

Особое внимание было уделено рассмотрению вопроса о влиянии вида насыщающего компонента и состава рабочей газовой среды на свойства диффузионных слоев титановых сплавов. Исследованию подвергались газовые среды на основе азота (ионное азотирование) и на основе кислорода воздуха (ионное альфирование).

При исследовании процесса ионного азотирования на первом этапе были использованы аргоно-азотные газовые среды, а так же среды азота особой чистоты и очищенного аргона, содержащего остаточный азот.

Исследованиями установлено, что фазовый состав диффузионных слоев титановых сплавов после ионного азотирования представляет собой сочетание фазы β -нитрида титана (TiN) на поверхности и диффузионной зоны твердого раствора с включениями дисперстной фазы ϵ нитрида титана (Ti_2N) под ним. Показано, что ионное азотирование в среде очищенного аргона, содержащего остаточный азот, позволяет избежать образования сплошного нитридного слоя β -нитрида титана на поверхности азотируемых образцов. Важно отметить, что выявлена возможность регулирования толщины диффузионных слоев при ионном азотировании титановых сплавов путём изменения содержания азота в рабочей газовой среде. Увеличение содержания азота приводит к уменьшению толщины азотированных слоев и увеличению поверхностной микротвёрдости, что связано с усилением процессов нитридообразования и развития на поверхности азотируемых образцов сплошного нитридного слоя, являющегося диффузионным барьером для насыщения титановых сплавов азотом. (см. Рис.1). Кинетика процесса ионного азотирования подчиняется параболическому закону, что естественно для процесса

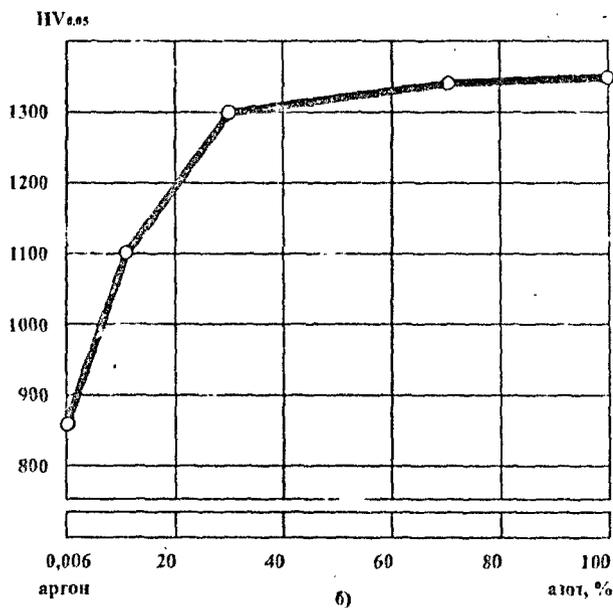
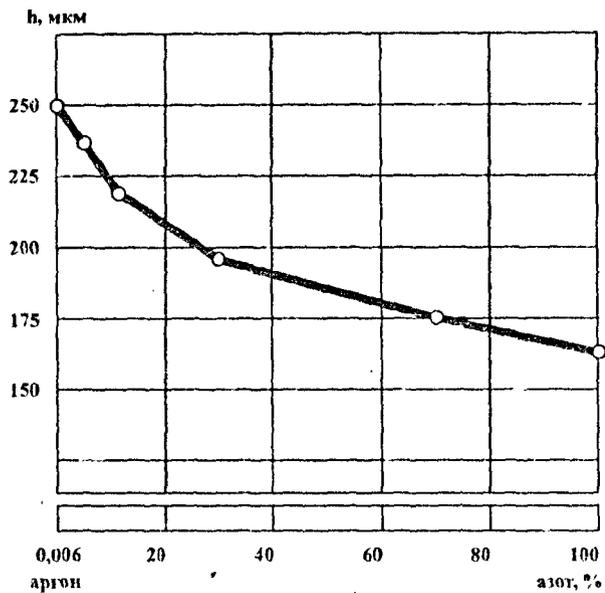


Рис.1 Влияние состава газовой среды на толщину диффузионных слоев (а) и поверхностную микро-твердость (б) при ионном азотировании сплава ВТ3-1.

химико-термической обработки. Увеличение давления рабочей газовой среды приводит к уменьшению толщины диффузионных слоев, что объясняется уменьшением эффекта катодного распыления и увеличением объемного содержания азота в газовой смеси.

Проведенные исследования дают ответ на вопрос о влиянии состава газовой среды при ионном азотировании на износостойкость титановых сплавов. Наибольшая в условиях проведенных экспериментов относительная износостойкость была получена после ионного азотирования в среде аргона, содержащего остаточный азот. Снижение относительной износостойкости титановых сплавов с увеличением содержания азота в рабочей газовой смеси для ионного азотирования автор связывает с зарождением и развитием сплошного нитридного слоя на поверхности азотируемых образцов. С одной стороны, это связано с уменьшением толщины диффузионных слоев, с другой стороны с тем, что при истирании высокотвердый слой нитрида титана растрескивается и скалывается, продукты износа попадают в пару трения, что, в свою очередь, резко увеличивает изнашивание поверхности титановых сплавов при трении.

Проведено исследование влияния технологических факторов ионного альфирования в аргоно-воздушных газовых средах на структуру и свойства титановых сплавов.

Важно отметить, что фазовый состав диффузионных слоев титановых сплавов после проведения процессов ионного альфирования при температуре 850°C определяется составом рабочих аргоно-воздушных газовых сред. Исследованию подвергались образцы титановых сплавов, прошедшие ионное альфирование в средах содержащих 3, 5, и 10% воздуха. При низком (3%) содержании воздуха диффузионный слой по своему фазовому составу представляет собой сочетание фаз окислов титана (TiO , Ti_2O_3) на поверхности образцов и диффузионного слоя на основе твердого раствора кислорода в титане. С ростом содержания воздуха в газовой среде появляется фаза оксида титана Ti_2O_3 , а при содержании 10% воздуха в газовой среде фиксируется наличие фазы рутила (TiO_2).

Проведенные эксперименты показывают, что увеличение содержания воздуха в газовой среде ионного альфирования титановых сплавов приводит к уменьшению толщины

диффузионных слоев (см. Рис. 2). Это объясняется тем, что оксиды титана являются диффузионными барьерами при насыщении титановых сплавов кислородом.

Так же отмечается, что повышение содержания воздуха в рабочей среде приводит к уменьшению поверхностной микротвёрдости титановых сплавов, что связано с различной твёрдостью образующихся фаз оксидов титана. Среди образующихся при ионном альфировании оксидов титана наибольшей твёрдостью обладает оксид титана (TiO_2), твёрдость же других оксидов значительно меньше.

Различным фазовым составом диффузионных слоев после ионного альфирования в различных по содержанию воздуха газовых средах объясняется зависимость относительной износостойкости титановых сплавов от состава среды ионного альфирования. С увеличением содержания воздуха в аргоно-воздушных газовых средах относительная износостойкость возрастает. Наибольшая в условиях проведённых исследований относительная износостойкость была получена при ионном альфировании титановых сплавов в аргоно-воздушных газовых средах, содержащих 10% воздуха (остальное-аргон). Данный состав газовой среды ионного альфирования определяет формирование оксидных фаз с пониженной микротвёрдостью по сравнению с фазами полученными после ионного альфирования в средах с содержанием воздуха 3% и 5%. Таким образом, низкую износостойкость поверхности титановых образцов после ионного альфирования в газовых средах, содержащих 3% и 5% воздуха (остальное аргон) можно связать с повышенной хрупкостью оксидных фаз, образующихся после ионного альфирования в данных средах.

В четвёртой главе на основании анализа проведённых исследований обоснован и выбран способ ионной химико-термической обработки титановых сплавов с целью повышения их износостойкости.

Проведён сравнительный анализ процессов ионного азотирования и ионного альфирования титановых сплавов. Отмечается, что во влиянии технологических факторов указанных процессов на структуру и свойства титановых сплавов много общего. Увеличение содержания насыщающего компонента (азота или кислорода) в газовой среде ионной химико-термической обработки уменьшает толщину диффузионных слоев и усиливает процесс образования на поверхности титановых сплавов нитрида при ионном азотировании и оксидов при ионном альфировании. Как

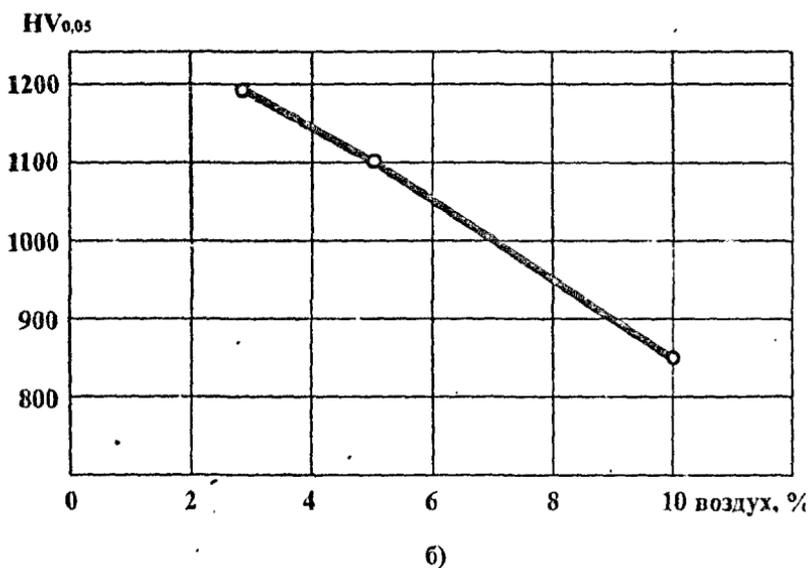
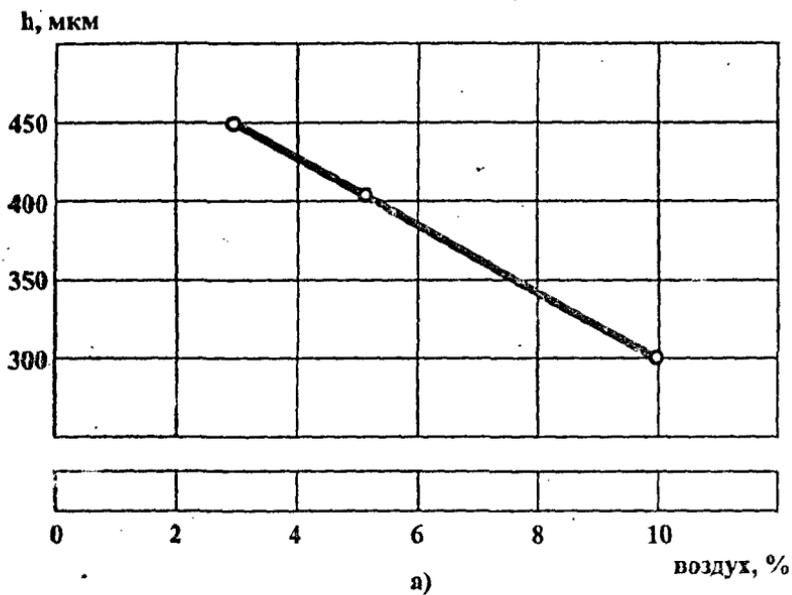


Рис.2 Влияние состава газовой среды на толщину диффузионных слоев (а) и поверхностную микро- твердость (б) при ионном альфировании сплава ВТ9.

было показано, нитриды и оксиды титана являются диффузионными барьерами для насыщения титана азотом и кислородом. Исследованиями влияния режимов ионной химико-термической обработки на износостойкость титановых сплавов показано, что процессы ионного азотирования и ионного альфирования приводят к увеличению износостойкости, причём, образование сплошного слоя нитридов или оксидов титана на поверхности обрабатываемых образцов отрицательно влияет на износостойкость титановых сплавов.

Необходимо отметить, что проведение процесса ионного альфирования по режиму, обеспечивающему наибольшую, в условиях проведённых экспериментов, относительную износостойкость, сопряжено с большими технологическими сложностями. Ионное альфирование по этому режиму неизбежно приводит к образованию в процессе ионного насыщения на поверхности титановых образцов отслаивающихся плёнок рутила (TiO_2), что совершенно недопустимо для стабильного протекания процесса ионной химико-термической обработки. Этим объясняется необходимость обязательного введения требования очистки катодной плиты (рабочего стола установки) и оснастки, изготовленных из титановых сплавов, после каждого проведённого процесса ионного альфирования от образовавшегося слоя рутила.

Кислородосодержащей средой при ионном альфировании титановых сплавов является атмосферный воздух. С одной стороны это очень удобно - воздух можно считать даровой (бесплатной) средой, с другой стороны содержание в воздухе кислорода зависит от климатического и экологического состояния атмосферы, что может вносить значительные погрешности при составлении рабочей смеси ионного альфирования.

В тоже время, процесс ионного азотирования титановых сплавов протекает стабильно при всех исследованных составах газовых сред, не вызывает образования отслаивающихся фаз, не требует дополнительных затрат при подготовке садки.

Исходя из вышеизложенного, автор предлагает при построении процесса ионной химико-термической обработки титановых сплавов с целью повышения их износостойкости предпочесть процесс ионного азотирования процессу ионного альфирования.

В представленной работе большое внимание уделяется .

вопросу о влиянии на технологичность процесса ионного азотирования вида газа разбавителя азота в рабочей смеси. Как было отмечено выше, процессы ионного азотирования титановых сплавов проводились в аргоно-азотных газовых средах. Отмечается, что нагрев титановых сплавов в газовых средах содержащих аргон, весьма затруднен. При выходе на температуру азотирования нагрев поверхности образцов значительно опережал нагрев сердцевинных образцов, что, зачастую приводило к перегреву поверхностных слоев и образованию недопустимой структуры диффузионного слоя. Для избежания данного эффекта нагрев приходилось проводить с малой скоростью и изотермическими выдержками на промежуточных температурах для выравнивания температуры по глубине образца. Длительность изотермических выдержек надо выбирать опытным путём для каждой конкретной детали.

Причина столь резкой разницы в нагреве поверхности и сердцевинных образцов титановых сплавов кроется в исключительно высоком тепловом эффекте бомбардировки поверхности образцов ионами аргона в сочетании с низкой, по сравнению с другими конструкционными материалами, теплопроводностью титана. Необходимо отметить, что при ионном азотировании нагрев деталей идет исключительно за счёт катодной бомбардировки поверхности деталей, мерой интенсивности которой служит коэффициент катодного распыления. По литературным данным коэффициент катодного распыления ионов аргона наивысший среди всех газов. Было сделано предположение, что взяв в качестве газа разбавителя азота в рабочей среде ионного азотирования титановых сплавов не аргон, а газ с меньшим коэффициентом катодного распыления можно снизить тепловой эффект катодной бомбардировки и тем самым, возможно, избежать перегрева поверхности титановых деталей. Наиболее подходящим в качестве такого газа является гелий. Ионы гелия обладают наименьшим среди инертных газов коэффициентом катодного распыления. Гелий, как и аргон, инертен по отношению к титану. Гелий высокой степени очистки производится и используется в промышленности. Важно отметить, что в своём составе гелий содержит остаточный азот в количестве сравнимом с содержанием остаточного азота в аргоне.

Для оценки теплового эффекта от катодной бомбар-

дировки ионами аргона и гелия титановых сплавов была применена теория "теплового клина". Из уравнения распределения температуры в "тепловом клине" следует, что тепловой эффект катодной бомбардировки определяется величиной энергии переданной атому решетки от летящего иона при их столкновении. Эта энергия определяется уравнением:

$$E_{\text{max атом}} = \frac{4 M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2} E_{\text{ион}}$$

где M_1 и M_2 - массы иона и атома, $E_{\text{ион}}$ кинетическая энергия летящего иона. Проведя необходимые вычисления получаем, что при столкновении с атомом решетки титана ион гелия передает ей 28% своей кинетической энергии, тогда как ион аргона - 99%. Таким образом, автор делает заключение о целесообразности использования во избежания перегрева поверхности деталей из титановых сплавов при ионном азотировании не аргоно-азотных, а гелиево-азотных газовых сред.

Проведены исследования влияния режимов ионного азотирования в гелиево-азотных газовых средах на структуру и свойства титановых сплавов.

Фазовый состав диффузионных слоев после ионного азотирования в гелиево-азотных газовых средах не отличается от фазового состава диффузионных слоев после ионного азотирования титановых сплавов в аргоно-азотных газовых средах. Нет принципиального различия и во влиянии технологических факторов ионного азотирования в аргоно-азотных и гелиево-азотных газовых средах на свойства диффузионных слоев. Особо необходимо отметить, что как при ионном азотировании титановых сплавов в аргоно-азотных газовых средах, так и при ионном азотировании в гелиево-азотных газовых средах наибольшая толщина азотированных слоев была получена после проведения процесса в газовой среде инертного газа без смешения его с азотом.

Практическое проведение процесса ионного азотирования титановых сплавов в среде гелия, содержащего остаточный азот, подтвердило ранее сделанное предположение о большей технологичности этого процесса по сравнению с процессом ионного азотирования в среде аргона, содержащего остаточный азот. При проведении ионного азотирования в среде гелия не возникает проблем, связанных с перегревом поверхности образцов из титановых сплавов, столь характерных для ионного

азотирования в среде аргона. Процесс нагрева садки как при выходе на температуру ионного азотирования, так и при изотермической выдержке при этой температуре протекает плавно и хорошо регулируется, что позволяет сделать вывод о лучшей управляемости процесса ионного азотирования в среде остаточного азота чистого гелия по сравнению с процессом ионного азотирования в среде остаточного азота чистого аргона.

В пятой главе определена область применения и даны рекомендации по использованию разработанного способа ионного азотирования.

Проведение стендовых испытаний титановой зубчатой пары, прошедшей ионное азотирование по разработанному режиму по сравнению с титановой зубчатой парой прошедшей серийную термическую обработку, показало увеличение износостойкости в несколько раз.

Таким образом, на основании вышеизложенного, можно признать, что разработанный процесс ионного азотирования в газовой среде гелия, содержащего остаточный азот, является высокоэффективным процессом повышения износостойкости титановых сплавов.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Установлены особенности формирования азотированного слоя при ионной химико-термической обработке в азоте, аргоно-азотных, гелиево-азотных газовых средах. На поверхности титановых сплавов после ионного азотирования в азоте образуется тонкий (3-7 мкм) сплошной нитридный слой TiN , под которым располагается протяженная диффузионная зона на основе твердого раствора азота в титане с включениями ϵ - нитрида титана ($Ti_{2-3}N$).

Показано, что уменьшением концентрации азота в исходной газовой среде ионного азотирования можно исключить образование нитридного слоя TiN на поверхности титановых сплавов.

2. Впервые установлены особенности формирования диффузионных слоев при ионном азотировании титановых сплавов в аргоно-воздушных газовых средах. Поверхностный слой представляет собой слой оксидов титана (TiO , Ti_2O_3 , Ti_4O_7 , TiO_2) на поверхности и диффузионной зоны на основе твердого раствора кислорода в титане под слоем оксидов.

Выявлено, что добавлением аргона в газовую атмосферу ионного азотирования можно регулировать фазовый

состав слоя оксидов на поверхности титановых сплавов. При малом содержании воздуха в газовой смеси преобладает образование оксидов титана с малым содержанием кислорода (TiO , Ti_2O_3). Увеличение содержания воздуха в аргоно-воздушной среде приводит к образованию оксидов с более высоким содержанием кислорода (Ti_4O_7 , Ti_2O_2).

3. Показано, что увеличение содержания насыщающего компонента газовой среды (азота или кислорода воздуха) при ионном азотировании и ионном альфирровании ведет к замедлению диффузионных процессов насыщения титановых сплавов из-за активизации процессов развития нитридных или оксидных слоев на поверхности, являющихся диффузионными барьерами, препятствующими насыщению титановых сплавов азотом и кислородом.

4. Выявлено, что износостойкость титановых сплавов после ионной химико-термической обработки зависит от состава газовых сред.

При ионном азотировании наибольшая в условиях проведенных исследований относительная износостойкость была достигнута после ионного азотирования в среде аргона, содержащего остаточный азот. Снижение относительной износостойкости титановых сплавов в 1,5-2 раза с увеличением содержания азота в газовой среде ионного азотирования связано с развитием сплошного нитридного слоя TiN на поверхности азотируемых образцов, что приводит к уменьшению толщины диффузионного слоя и провоцирует абразивный износ из-за выкрашивания нитридного слоя.

При ионном альфирровании титановых сплавов уменьшение содержания воздуха в смеси с аргоном с 10% до 3% приводит к понижению относительной износостойкости в 1,5-3 раза, что связано с повышенной хрупкостью оксидных фаз, образующихся при ионном альфирровании в средах с низким содержанием воздуха.

5. Определены технологические преимущества процесса ионного азотирования перед процессом ионного альфирования. Проведение процесса ионного альфирования по режиму, обеспечивающему наибольшую относительную износостойкость (10% воздуха, остальное аргон), крайне затруднено из-за сильной нестабильности протекания процесса насыщения, связанной с отслаиванием образующихся пленок рутила (TiO_2) с поверхности. Протекание процесса ионного азотирования в любых по составу газовых средах достаточно стабильно. Это говорит о техно-

гических преимуществах процесса ионного азотирования перед процессом ионного альфирования.

6. Впервые показано, что ионное азотирование в среде гелия, содержащего остаточный азот, технологически предпочтительнее ионного азотирования в среде аргона, содержащего остаточный азот. Процесс нагрева при ионном азотировании в среде аргона, содержащего остаточный азот идет весьма интенсивно, что приводит к локальному перегреву поверхности. Тепловой эффект от катодной бомбардировки ионами гелия меньше, чем ионами аргона, нагрев поверхности происходит более плавно и перегрева не происходит.

7. Определены режимы ионного азотирования титановых сплавов с целью повышения их износостойкости. Рекомендовано азотирование α и $\alpha+\beta$ титановых сплавов проводить в среде гелия, содержащего остаточный азот, при температуре 850°C, давление газовой среды и время ионного насыщения назначается в зависимости от требований технических условий и конкретной геометрии деталей.

8. Рекомендовано применять ионное азотирование в гелии для повышения износостойкости деталей авиационных двигателей и самолетов (обоймы подшипников, корпуса клапанов, детали механизмов управления крыла).

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Арзамасов Б.Н., Громов В.И., Сосков М.Д. Влияние режимов ионного азотирования на структуру и свойства титановых сплавов // Металловедение и термическая обработка металлов. - 1996. - № 5. - С.26-28.

2. Арзамасов Б.Н., Громов В.И., Сосков М.Д. Влияние состава газовой смеси при ионной химико-термической обработке титанового сплава в аргоно-воздушных средах // Изв. вузов. Машиностроение. - 1996. - № 7-9. - С.109-112.

3. Арзамасов Б.Н., Громов В.И. Повышение износостойкости титановых сплавов методом ионной химико-термической обработки // Трение и износ. - 1998. - Т. 19. - № 2. - С.224-226.

4. Технологические основы ионного азотирования сплавов / Б.Н. Арзамасов, А.В. Виноградов, В.И. Громов и др. // Машиностроительные технологии: Тез. докл. Всерос. научн. - техн. конф. - М., 1998. - С.244-245.