

На правах рукописи

КРИВИНА Людмила Александровна

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПАР ТРЕНИЯ МЕТОДАМИ
ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

05.02.04 - Трение и износ в машинах

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в Институте проблем машиностроения РАН – филиале
ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной
физики Российской академии наук»

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор

Ерофеев Владимир Иванович

Научный консультант:

кандидат физико-математических наук

Тарасенко Юрий Павлович

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

Защита состоится «___» _____ 2019 года в _____ часов на заседании
диссертационного совета _____

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте

Автореферат разослан: « ___ » _____ 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета _____

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Основными показателями качества ответственных узлов машин являются надежность, работоспособность и коэффициента полезного действия, которые, преимущественно, определяются свойствами поверхностных слоев сопрягаемых деталей – твердостью, коэффициентом трения, износостойкостью, коррозионной стойкостью и др. Каждый останов машины из-за повреждения ее отдельных элементов или снижения технических характеристик ниже допустимого уровня, как правило, влечет за собой материальные убытки, а в отдельных случаях приводит к катастрофическим последствиям. Достижение высокой эксплуатационной надежности машин возможно на основе применения наукоемких технологий управления функциональными свойствами деталей машин за счет направленного создания поверхностных слоев с заданными свойствами, что находит практическое использование и в настоящее время актуально не только для основного, но и ремонтного производства.

Современные материалы конструкционного, инструментального и функционального назначения, должны иметь высокие значения твердости, износостойкости, усталостной прочности и коррозионной стойкости. В настоящее время это достигается такими технологическими методами, как нанесение пленок, покрытий и защитных слоев; изменение физико-химических свойств поверхностных слоев основного материала детали методами модифицирования; комбинированные методы обработки, сочетающие модифицирование поверхности и нанесение покрытий. В конкретных случаях задача выбора этих методов представляет сложную технико-экономическую задачу, решение которой является актуальной и для трибологии.

Цель работы. Целью диссертационной работы является повышение работоспособности, долговечности и надежности пар трения «полуось-подшипник» и «игла-подпятник», являющихся ответственными узлами трения газовой центрифуги K4110. Поставленная цель в работе решается:

- путем повышения износостойкости стальных деталей «полуось» и «игла» посредством модификации их рабочих поверхностей методами ионно-плазменного нанесения наноструктурированного столбчатого покрытия нитрида титана (TiN) и частотно-импульсной имплантации ионами C^+ (соответственно);
- путем замены материала стальной полуоси и материала металлокерамического подпятника для повышения ресурса узлов в целом.

В соответствии с указанной целью работы были поставлены и решены следующие задачи:

- разработка технологического процесса ионно-плазменного напыления и выбор оптимального режима нанесения износостойкого наноструктурированного покрытия нитрида титана на стальную деталь «полуось» ответственной пары трения «полуось-подшипник»;
- выбор более теплостойкой марки стали для изготовления детали «полуось» для пары трения «полуось-подшипник»;

- разработка режима имплантации ионов C^+ рабочей поверхности стальной «иглы» пары трения «игла-подпятник» и разработка технологического процесса ионно-лучевой обработки;
- выбор нового металлокерамического материала для изготовления детали «подпятник» для пары трения «игла-подпятник»;
- испытания работоспособности модифицированных пар трения.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- Для повышения ресурса ответственного узла газовой центрифуги, а именно, пары трения «полуось-подшипник», разработан и научно обоснован метод поверхностного упрочнения стальной детали «полуось» посредством ионно-плазменного нанесения износостойкого покрытия нитрида титана.
- Установлены закономерности формирования наноструктурированного покрытия при уменьшении тока дуги (от 140 до 120 А) и парциального давления газа в камере (от 0,06 до 0,04 Па). Разработан технологический процесс ионно-плазменного напыления (методом КИБ) на установке ВУ2-МБС в узком интервале технологических параметров с целью получения износостойкого покрытия TiN со столбчатой структурой зерен, обеспечивающей снижение коэффициента трения и повышение прочностных характеристик стальной детали «полуось».
- Методом скретч-теста изучены механизмы разрушения покрытий, нанесенных при разных технологических режимах. Установлено, что наноструктурированное столбчатое покрытие TiN, формируемое в узком диапазоне технологических параметров (напряжение смещения 140 В, ток дуги 120 А, давление реакционного газа в камере 0,04 Па), имеет повышенный ресурс в связи с его высокой адгезионной прочностью.
- Получены и научно обоснованы результаты комплексных исследований по установлению причин низкой работоспособности пары трения «игла-подпятник». С позиций физического металловедения даны представления о кинетике механизма коррозионно-механического износа стальной детали «игла». Установлено, что отказ в работе данного узла обусловлен низкой износостойкостью вращающейся стальной детали «игла» и повышенной склонностью к хрупкому разрушению контртела «подпятник», изготовленного из лейкосапфира. Для повышения ресурса данного узла предложен метод поверхностного упрочнения стальной «иглы» посредством ионной имплантации ионами C^+ и замены материала (лейкосапфир) «подпятника» на диоксид циркония.
- Установлены закономерности модификации поверхностного слоя рабочей зоны «иглы» при ионно-лучевой обработке. Установлена оптимальная доза облучения ($D=10^{18}$ см⁻²), при которой достигается максимальный эффект упрочнения и улучшение антифрикционных свойств обрабатываемого материала.

Методы исследования. В процессе исследований использованы методы оптической и электронной микроскопии, рентгенографии, метод измерения микротвердости, определение микрохрупкости, определение характеристик пластичности, а также измерения коэффициента трения, испытания

износостойкости, испытания адгезионной прочности методом склерометрии.

Достоверность результатов обеспечивалась грамотной методологией при решении поставленных задач, комплексным подходом при анализе причин отказа в работе узлов трения; корректным использованием теоретических положений, применением современных методов исследований, испытательного оборудования и высокоточных приборов, а также большим объемом экспериментальных данных и их статистической обработкой.

На защиту выносятся результаты и положения:

- Результаты исследований исходного и постэксплуатационного состояния деталей штатных узлов трения газовой центрифуги, результаты анализа по установлению причин преждевременного отказа их работоспособности.
- Результаты исследований структуры, микротвердости и трибологических свойств, адгезионной прочности ионно-плазменного покрытия нитрида титана, нанесенного на стальную деталь «полуось» для пары трения «полуось-подшипник».
- Изучены закономерности формирования покрытия TiN со столбчатой структурой зерен при варьировании технологических режимов ионно-плазменного напыления. Установлено, что формирующееся покрытие имеет наноструктурированное состояние в узком диапазоне технологических параметров: напряжение смещения 140 В, ток дуги 120 А, давление реакционного газа в камере 0,04 Па.
- Осуществлена замена материала (сталь ХВГ) детали «полуось» на другой конструкционный материал (сталь Х12Ф1), обладающий более высокой устойчивостью структурно-фазового состояния при сопутствующем нагреве в процессе ионно-плазменного напыления покрытия TiN.
- Результаты натурных испытаний пары трения «полуось-подшипник» в форсированном режиме (с изгибающим дисбалансом $5 \cdot 10^{-5}$ кг, боковой нагрузкой 48 Н в момент перехода вертикальным валом собственной частоты, окружной скорости – 11 м/с в условиях граничной смазки подшипника маслом VM-1), обеспечивающих высокую износостойкость покрытия за счет нанесения покрытия нитрида титана, что позволило увеличить количество безаварийных проходов через критические точки в 3 раза и увеличить при этом допустимый изгибающий дисбаланс полуоси во время ее балансировки в 1,5 раза.
- Результаты исследований структуры, микротвердости, коэффициента трения, износостойкости модифицированного методом ионной имплантации ионов C^+ рабочей поверхности стальной «иглы» для пары трения «игла-подпятник».
- В результате оптимизации технологии ионно-лучевой обработки установлен максимальный упрочняющий эффект на рабочей поверхности «иглы» из стали У10 при ионной имплантации дозой 10^{18} см⁻². Радиационно-стимулированное упрочнение сопровождается снижением коэффициента трения модифицированной поверхности и повышением износостойкости и ресурса узла трения в целом.
- Комплексный подход к модернизации пары трения «игла-подпятник» с позиций физического материаловедения, примененный в работе, позволил предложить замену материала контртела, а именно, вместо лейкосапфира

использовать диоксид циркония, стабилизированный 3 % оксидом иттрия, полученный методом направленной кристаллизации, который обладает повышенной стойкостью к ударным нагрузкам.

Практическая значимость:

Разработан технологический процесс (ТП-002-00-00) нанесения износостойкого наноструктурированного покрытия нитрида титана. Разработанное износостойкое покрытие апробировано и внедрено на предприятиях машиностроительной отрасли, для повышения работоспособности и надежности различных деталей пар трения:

- стальная деталь «полуось» пары трения «полуось-подшипник», которая является ответственным узлом трения газовой центрифуги К4110 (ОАО «ВПО «Точмаш» (г. Владимир), ОАО «КМЗ» (г. Ковров) и ООО «УЗГЦ» (г. Новоуральск);
- стальная деталь, входящей в систему виброизоляции тренажера «Бегущая дорожка» БД-2, предназначенного для использования на Международной космической станции (МКС) (СГАУ им. С. П. Королёва (г. Самара));
- стальные плунжерные пары топливных насосов автомобильных двигателей (машиностроительные предприятия Казахстана).

Разработан технологический режим ионной обработки поверхности детали «игла» для внедрения в составе узла трения «игла-подпятник» для ОАО «ОКБ - Нижний Новгород» (г. Нижний Новгород).

Апробация работы. Материалы диссертационной работы были представлены на Международных и Всероссийских конференциях: Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», 28-30 июня 2011 г., Самара; Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», 22-24 июня 2016 г., Самара; 13-я Международная конференция «Пленки и покрытия – 2017», 18-20 апреля 2017 г., Санкт-Петербург; 2-ая Молодежная научно-практическая конференция, 13-16 июня 2017 г., Нижегородская область, п. Варнавино; 5-ая Международная научная конференция «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении», 8-10 ноября 2017 г., Москва.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы изложено в 15 печатных работах, опубликованных в научных журналах и сборниках трудов конференций, из них - 3 статьи в журналах, рекомендуемых ВАК, 1 статья Web of Science, 1 патент РФ на изобретение.

Диссертационная работа выполнена в рамках КПНИ «Разработка научных основ инновационных технологий в станкостроении».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, сформулированы основные цели, задачи и положения, выносимые на защиту, определена практическая значимость работы.

В **первой главе** приводятся обзор и анализ литературных данных

технологических методов направленного создания поверхностных слоев с заданными свойствами для достижения высокой эксплуатационной надежности различных деталей машин в машиностроительной отрасли. Показано, что в настоящее время одновременное развитие получили CVD- и PVD-методы, и в рамках каждого из них для применяемого технологического оборудования необходимо проводить работы по разработке технологических режимов с учетом особенностей структурно-фазового состояния, механических и трибологических свойств упрочняемых поверхностей. Комплексные исследования необходимы для понимания закономерностей формирования поверхностных слоев, обеспечивающих получение оптимального комплекса эксплуатационных свойств. Исходя из анализа литературных данных, были сформулированы основные задачи исследования, решению которых посвящена диссертация.

Во **второй главе** приведены режимы нанесения ионно-плазменного износостойкого покрытия, режимы ионно-лучевой обработки, описаны методики исследования структуры – электронная микроскопия, оптическая металлография, рентгенография; механических свойств – метод микротвердости, метод оценки микрохрупкости; фрикционных и износостойких свойств – определение коэффициента трения при сухом скольжении, величины износа и интенсивности изнашивания, скретч-метод оценки адгезионной прочности, а также описана обработка полученных экспериментальных данных.

В **третьей главе** приведены результаты проведенных исследований.

В **подглаве 3.1** предложен метод поверхностного упрочнения стальной детали «полуось» посредством ионно-плазменного нанесения покрытия нитрида титана для повышения ресурса ответственного узла газовой центрифуги, а именно, пары трения «полуось-подшипник».

Ограничительный подшипник скольжения, внутри которого вращается вал ротора центрифуги при радиальных нагрузках до 50 Н и окружных скоростях до 11 м/с, служит для ограничения резонансных колебаний, возникающих во время его разгона до номинальной скорости. Ротор центрифуги имеет ограничительную мощность электропривода, проходит резонансную частоту в режиме квазистатического перехода в течение 5...10 минут. При стабильной работе пара «полуось–подшипник» имеет увеличенный зазор до такого значения, при котором отсутствует механический контакт до и после резонанса. В процессе взаимодействия пары повышается коэффициент трения из-за явления адгезионного схватывания, особенно, при дефиците смазки, каковой является фитильная смазка в центрифуге. В результате увеличивается сила трения, риск непрохода центрифугой резонансной частоты, и не выполняется требование выдерживать многократные разгоны.

Решена основная задача – разработка процесса ионно-плазменного напыления применительно к новым полуосям из стали ХВГ с целью получения износостойкого наноструктурированного покрытия TiN.

Ионно-плазменное покрытие TiN наносили на установке ВУ-2МБС на малогабаритные тонкостенные образцы из стали ХВГ по режимам,

приведенным в таблице 1.

Нанесение покрытия проводили при фиксированных временах обработки в одном технологическом цикле: очистка и активация поверхности деталей методом ионной бомбардировки Ti^+ в периодическом режиме: 5 сек (обработка) +5 сек (пауза) – 2 цикла; нанесение подслоя $\alpha-Ti$ – 8 минут; нанесение переходного слоя $\alpha-Ti + TiN$ – 2 минуты; нанесение покрытия TiN – 50 минут.

Таблица 1 – Технологические режимы ионно-плазменного напыления покрытия нитрида титана

Технологические параметры напыления	Парциальное давление реакционного газа в рабочей камере P, Па	
	0,04	0,06
Ток дуги I_d , А (опорное напряжение $U = 140$ В)	160	160
	140	140
	120	120

Методом электронной микроскопии установлено, что при всех исследованных режимах напыления формируется покрытие со столбчатой структурой зерен TiN (толщиной 3,5-4 мкм) (рисунок 1).

Установлена тенденция формирования наноструктурированных зерен TiN с уменьшением давления реакционного газа в камере и тока дуги (рисунок 2а). С точки зрения формирования наноструктурированного покрытия TiN определен оптимальный режим напыления: напряжение смещения 140 В, давление реакционного газа в камере 0,04 Па, ток дуги 120 А, при котором получено столбчатое покрытие с минимальным поперечным размером зерен ~ 60 нм.

Методом рентгеноструктурного анализа установлено, что при всех исследованных режимах напыления формируется покрытие с кубическим типом кристаллической решетки $\delta-TiN$ с преимущественной ориентацией зерен в направлении (111).

Поскольку толщина покрытия сравнима с глубиной индентирования, то проводили теоретические расчеты истинной микротвердости покрытия по формуле, учитывающей влияние подложки на процесс измерения:

$$H_{\mu} = H_k + \frac{H_k + H_0}{2\left(\frac{t}{h}\right) + 3\left(\frac{t}{h}\right)^2}, \text{ (ГПа)}$$

где $H_{\text{покр}}$ – микротвердость покрытия, H_k – микротвердость композиции, $H_{\text{подл}}$ – микротвердость подложки, t – толщина покрытия, h – глубина индентирования.

Полученные зависимости изменения микротвердости покрытия TiN от тока дуги при разных парциальных давлениях газа в камере показали, что максимальное значение $H_{50} \sim 19,4$ ГПа покрытия получено при токе дуги

$I_d=120$ А и обусловлено формированием самой мелкодисперсной микроструктурой. С увеличением тока дуги и давления газа в камере установлено снижение микротвердости покрытия за счет увеличения размера зерен (рисунок 2б).

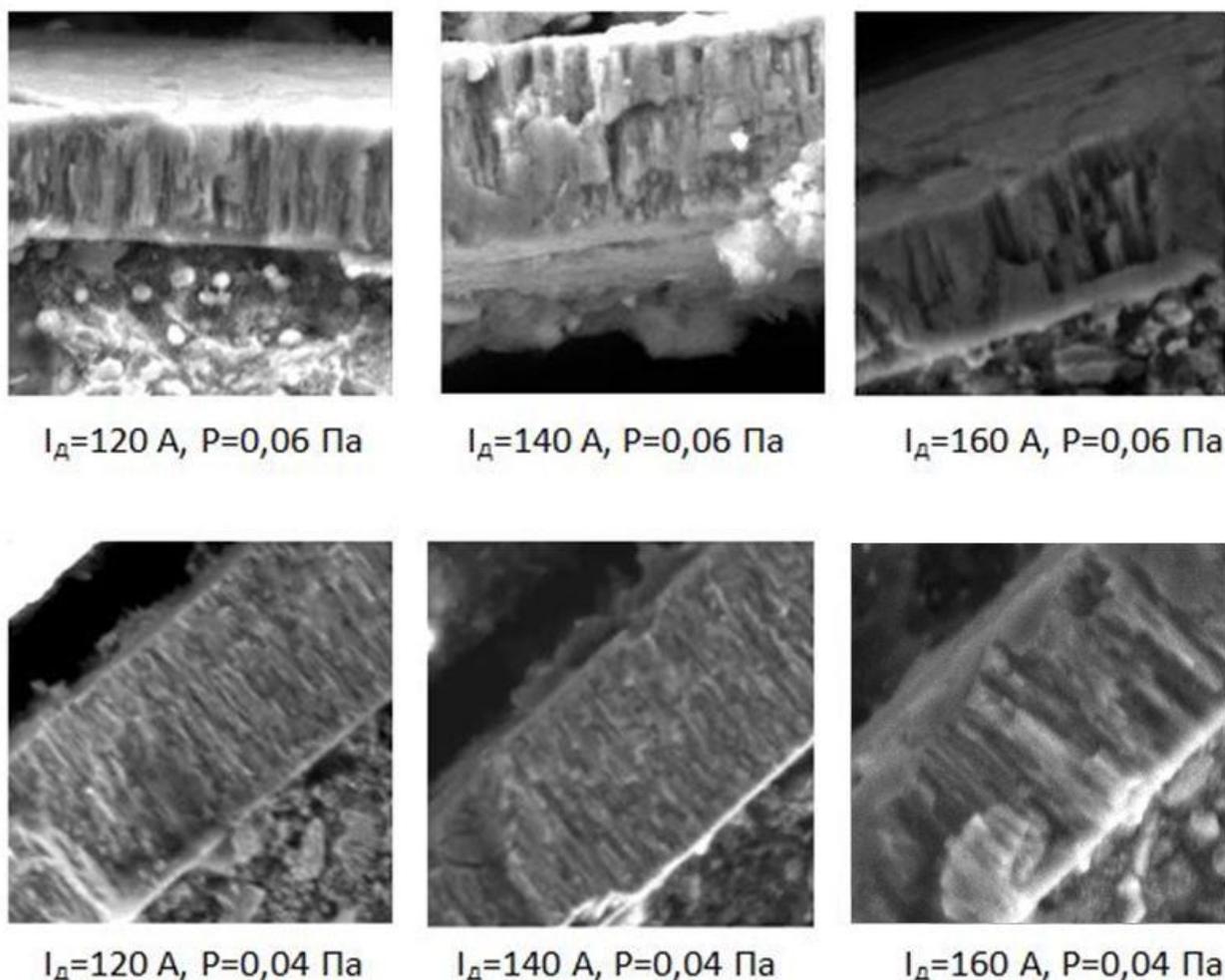


Рисунок 1 – Столбчатое покрытие TiN, полученное при различных режимах напыления, $\times 10000$

Шероховатость покрытий нитрида титана, полученных при разных режимах напыления, соответствует 10-11-ому классу.

Исследование фрикционных свойств проведены при сухом скольжении шарового индентора из сапфира с нормальной нагрузкой 1 Н. Нанесение нитридного покрытия способствует понижению коэффициента трения обрабатываемой поверхности. Напыление покрытия TiN по оптимальному режиму ($U=140$ В, $P=0,04$ Па, $I_d = 120$ А) приводит к уменьшению коэффициента трения рабочей поверхности стальной полуоси в $\sim 1,4$ раза (рисунок 2в).

Трение – сложное явление, зависящее от физико-механических и химических свойств трущихся тел. Согласно молекулярно-деформационной

теории трения коэффициент трения – сумма молекулярной и деформационной составляющих:

$$f = f_M + f_D \quad (1)$$

Он складывается из сопротивления, обусловленного деформированием тонкого поверхностного слоя внедрившимися микронеровностями и сопротивления, возникающего вследствие межмолекулярных взаимодействий в достаточно сближенных участках твердых тел. В условиях пластического контакта, когда деформационной составляющей можно пренебречь (для гладких поверхностей с классом шероховатости выше 10-го), коэффициент трения:

$$f = \frac{\tau_c}{H}, \quad (2)$$

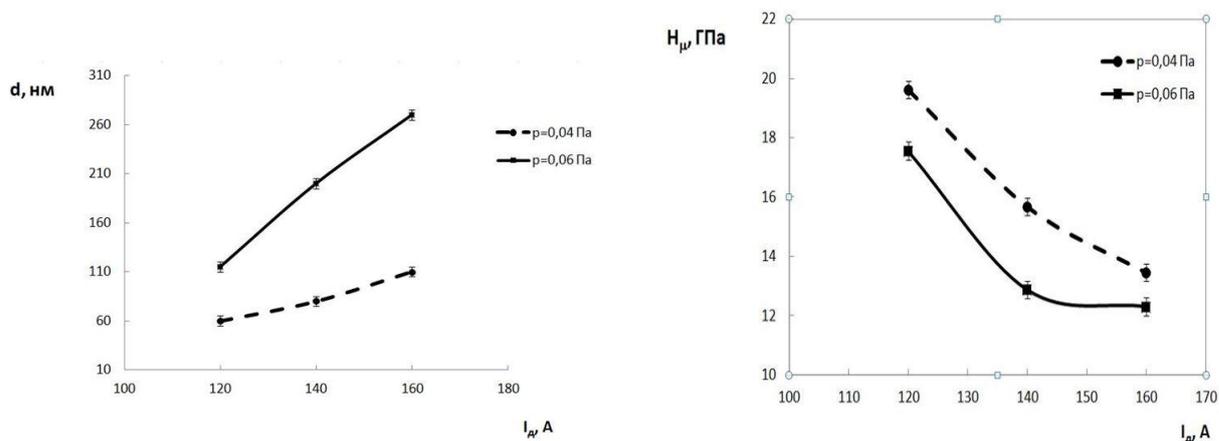
где τ_c – среднее напряжение на срез поверхностного слоя, H – твердость менее твердого материала пары трения. Целесообразны два основных пути снижения коэффициента трения и повышения износостойкости материала – увеличение твердости трущихся поверхностей и снижение прочности адгезионной связи между контактирующими телами. В условиях ненасыщенного пластического контакта коэффициент трения для сухого скольжения единичного шарового индентора по плоскости может быть выражен как:

$$f = \frac{\tau_c}{HB} + \frac{0,31}{R} \sqrt{\frac{N}{HB}}, \quad (3)$$

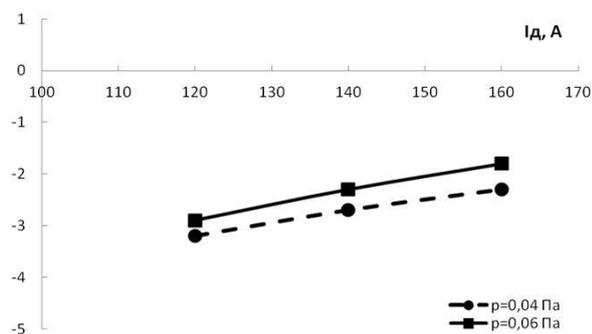
где τ_c – среднее напряжение на срез, HB – твердость по Бринелю, N – нагрузка на индентор, R – радиус шарового индентора. Рассчитав в соответствии с (3) деформационную составляющую коэффициента трения f_D и используя экспериментальное значение коэффициента трения f , можно определить молекулярную составляющую f_M .

Количественные оценки показали, что в столбчатом покрытии напряжение на срез существенно меньше по сравнению с круглозерненным покрытием. Это обусловлено тем, что в ГЦК-решетке плотноупакованные плоскости типа (111) являются плоскостями преимущественного скольжения, для которых понижено напряжение на срез при трении. Наряду с повышенной твердостью уменьшение τ_c способствует снижению потерь на трение.

Испытания износостойкости проводили при сухом поперечном контакте вращающегося стержня (сталь У10, $H_{200} = 8$ ГПа) диаметром ~ 8 мм с нагрузкой $N=3$ Н в течение различного времени. Износостойкость исходного материала и покрытия TiN оценивали по геометрическому параметру – диаметру пятна износа. Величина износа подложки (сталь ХВГ) и покрытий TiN, полученных при давлениях реакционного газа $P=0,04$ Па, $P=0,06$ Па от времени испытаний приведена на рисунке 3. Напыление покрытия по оптимальному режиму способствует уменьшению величины износа рабочей поверхности в ~ 4 раза.

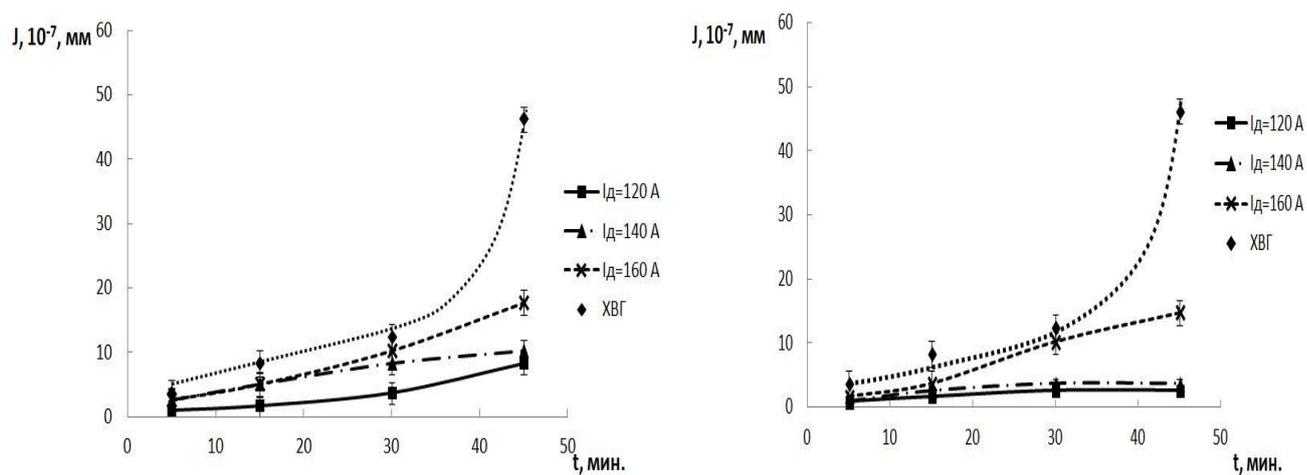


а б



в

Рисунок 2 – Зависимости поперечного размера столбчатых зерен TiN(а), микротвердости (б) и относительного изменения коэффициентов трения (в)



а

б

Рисунок 3 – Зависимости величины износа от времени испытаний для материала подложки из стали ХВГ и покрытий TiN, полученных при $U_{cm}=140$ В, $P=0,06$ Па (а) и $U_{cm}=140$ В, $P=0,04$ Па (б) и различных значениях тока дуги

Твердые покрытия, как правило, обладают повышенной хрупкостью и склонны к отслаиванию, что достаточно просто зарегистрировать методом склерометрии. На рисунках 4, 5 представлены результаты склерометрических испытаний, панорамы царапин по всей длине, фотографии царапин, полученных при различных нагрузках на индентор, для исследуемых покрытий нитрида титана.

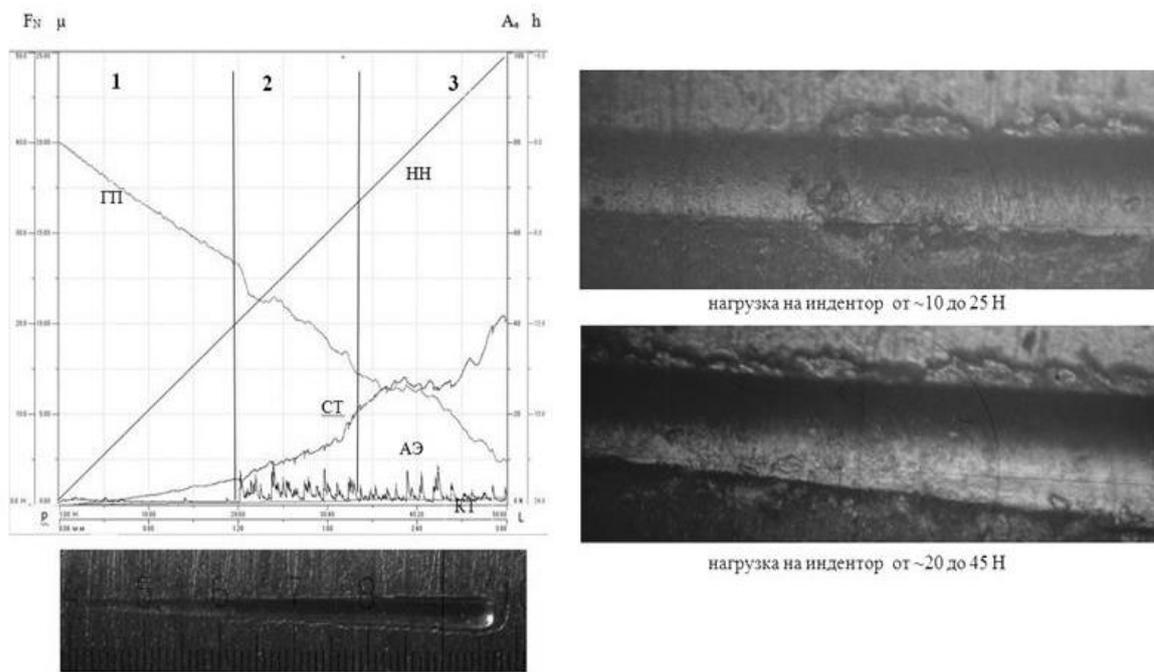


Рисунок 4 – Панорамные снимки царапины (x200) и кривые изменения сигналов разных датчиков при царапании композиции «TiN–сталь ХВГ» при нарастающей нагрузке: НН - величина нормальной нагрузки (P); ГП – глубина проникновения индентора (h); СТ– значение силы трения (F_N); АЭ – значение акустической эмиссии (A_e); КТ – значение коэффициента трения (μ) для TiN, полученного по режиму $I_d=160$ А, $P=0,04$ Па

Результаты склерометрических испытаний для покрытий, полученных при различных режимах ионно-плазменного напыления, приведены в таблице 2. При анализе результатов адгезионных испытаний можно четко выделить различные пороговые значения критической нагрузки, приводящие к различным типам разрушения. Три стадии разрушения характерны для покрытий с микротвердостью ≤ 13 ГПа (рисунок 4) и две стадии - для покрытий с микротвердостью ≥ 15 ГПа (рисунок 5).

Склерометрические испытания при помощи скретч-тестера позволили определить адгезионную прочность покрытий нитрида титана, полученных при различных режимах ионно-плазменного напыления. По результатам проведенных испытаний установлено, что наибольшую адгезионную прочность имеет покрытие нитрида титана, полученное при технологическом режиме (напряжение смещения $U=140$ В, ток дуги $I_d=120$ А, давление реакционного газа в камере $P=0,04$ Па), обеспечивающем формирование

наноструктурированного столбчатого покрытия TiN.

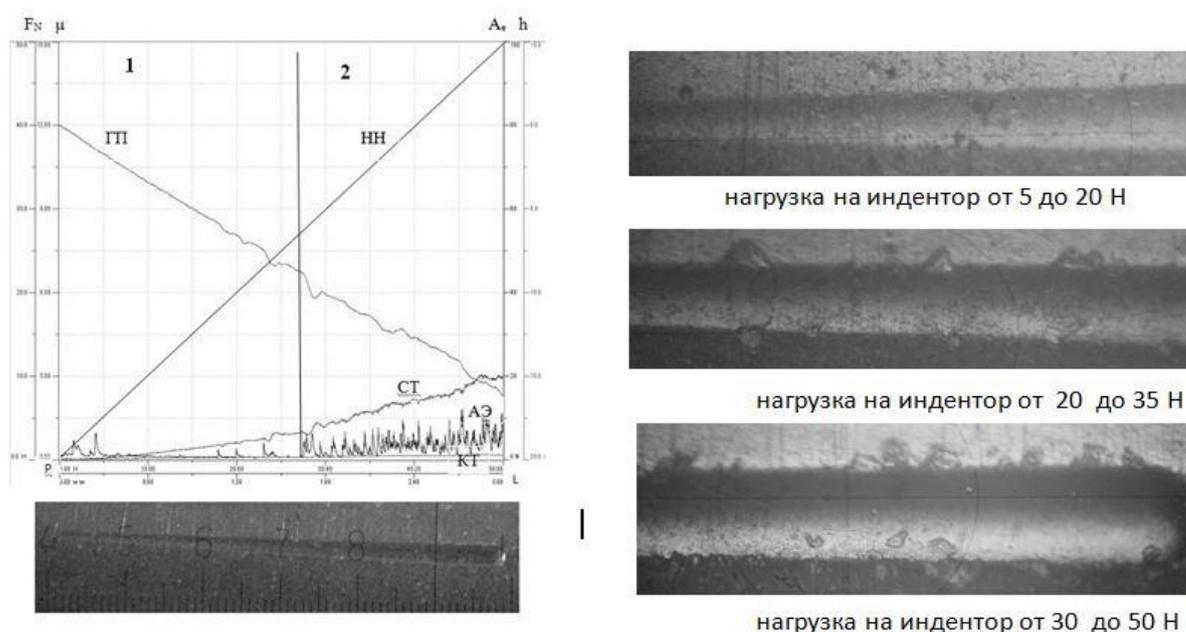


Рисунок 5 – Панорамные снимки царапины (x200) и кривые изменения сигналов разных датчиков при царапании композиции «TiN –сталь ХВГ» при нарастающей нагрузке: НН - величина нормальной нагрузки (P); ГП – глубина проникновения индентора (h); СТ– значение силы трения (F_N); АЭ – значение акустической эмиссии (A_e); КТ – значение коэффициента трения (μ) для TiN, полученного по режиму $I_d=120$ А, $P=0,04$ Па

При внедрении технологического процесса обработки на серийных партиях деталей «полуось» дополнительно была предложена замена стали ХВГ на марку стали Х12Ф1, которая обладает большей теплостойкостью и устойчивостью структурно-фазового состояния.

По результатам исследований определен оптимальный режим нанесения ионно-плазменного покрытия нитрида титана - напряжение смещения 140 В, ток дуги 120 А, давление реакционного газа в камере 0,04 Па, при котором формируется столбчатое наноструктурированное покрытие с оптимальным сочетанием физико-механических, трибологических и прочностных свойств.

Предложена замена основного материала полуоси – стали ХВГ на сталь Х12Ф1.

В подглаве 3.2 представлены комплексные исследования по установлению причин низкой работоспособности пары трения «игла-подпятник», являющейся ответственным узлом газовой центрифуги. Для повышения прочности и ресурса данного узла предложен метод поверхностного упрочнения стальной «иглы» посредством ионной имплантации ионов C^+ и замены материала «подпятника» из лейкосапфира на диоксид циркония.

Таблица 2 – Результаты склерометрических испытаний покрытий нитрида титана, полученных при различных режимах ионно-плазменного напыления

Режим ионно-плазменного напыления покрытия TiN	Микротвердость покрытия TiN, ГПа	Результаты склерометрических испытаний
P=0,04 Па, I _д =120 А, U=140 В	19,62	Фрагментарное когезионное разрушение покрытия – выше 28 Н. Фрагментарное адгезионное разрушение покрытия – 49 Н.
P=0,04 Па, I _д =140 А, U=140 В	15,68	Фрагментарное когезионное разрушение покрытия – 26 Н. Фрагментарное адгезионное разрушение покрытия – выше 45 Н.
P=0,04 Па, I _д =160 А, U=140 В	13,45	Фрагментарное адгезионное разрушение покрытия – 20 Н. Пропахивание материала подложки – выше – 33 Н.
P=0,06 Па, I _д =120 А, U=140 В	17,56	Фрагментарное когезионное разрушение покрытия – 23 Н. Фрагментарное адгезионное разрушение покрытия – 48 Н.
P=0,06 Па, I _д =140 А, U=140 В	12,87	Фрагментарное адгезионное разрушение покрытия – 16 Н. Пропахивание материала подложки – выше 40 Н.
P=0,06 Па, I _д =160 А, U=140 В	12,30	Фрагментарное адгезионное разрушение покрытия – 28 Н. Пропахивание материала подложки – выше 45 Н.

Пара трения «игла-подпятник» в составе узла газовой центрифуги работает в высокоскоростном режиме в среде смазочного материала (вакуумное масло марки ВМ-1). Подпятники и иглы изготавливают согласно конструкторской документации из керамического материала – лейкосапфира (Al₂O₃) и стали У10 соответственно. В работе данного узла выделяют три стадии эксплуатации (цикл): разгон, установившийся стационарный режим и торможение. Через несколько производственных циклов наступает стадия снижения работоспособности узла вплоть до отказа. В условиях стационарного режима работы игла вращается вокруг своей оси со скоростью 106000 об/мин и упирается в подпятник с усилием P=10 Н, что соответствует окружным скоростям в разных точках поверхности скольжения V_{min}=4,3 м/сек, V_{max}=7,5 м/сек и удельному давлению на поверхность контакта P=8 МПа. Визуально-

оптическим осмотром установлено, что недостаточная работоспособность указанной пары трения связана с повышенным износом рабочей части стальной иглы и склонностью материала подпятника из лейкосапфира к хрупкому разрушению.

На рисунке 6 приведены фотографии фрагментов поверхностей скольжения игл, характеризующие специфику износа при эксплуатации.

На поверхностях скольжения после эксплуатации наблюдаются концентрические бороздки абразивного износа и следы адгезионно-коррозионного изнашивания.

Износ рабочей поверхности игл после 5-ти производственных циклов носит абразивный характер. Вид износа поверхности трения игл после 7-ми производственных циклов - смешанный: абразивно-адгезионный. Анализ поверхностей трения игл после 17-ти производственных циклов показал преобладание пятен адгезионного износа.

Исследования игл в постэксплуатационном состоянии после отработки 5-ти, 7-ми и 17-ти производственных циклов, а также после потери их работоспособности показали, что чем больше разгонов проходит пара трения, тем ниже микротвердость поверхности в рабочей зоне иглы (таблица 3). После 7-ми производственных циклов микротвердость рабочей поверхности иглы находится на минимально допустимом уровне, после 17-ти циклов, а также после потери работоспособности пары трения – ниже допустимого значения.

На рисунке 7 приведены микрофотографии контактирующей поверхности лейкосапфирового подпятника, отработавшего 5 производственных циклов.

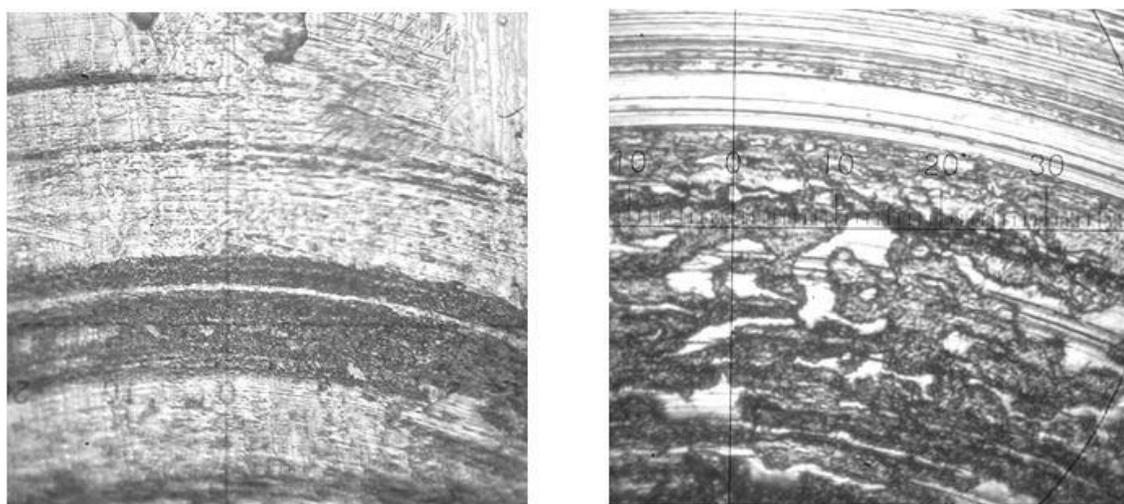
Таблица 3 – Средние значения микротвердости материала игл в рабочих зонах

Состояние детали	Среднее значение микротвердости H_{50} , ГПа
по требованию технической документации	≥ 8
новое	9,7
5 циклов	9,0
7 циклов	8,3
17 циклов	7,8
после потери работоспособности	7,4

Ионную имплантацию рабочих поверхностей трения стальных игл проводили на частотно-импульсном ускорителе «Радуга» при энергии ионов C^+ $E=80$ кэВ и плотности тока $j=6$ А/см² дозами: 10^{16} см⁻²; $5 \cdot 10^{16}$ см⁻²; 10^{17} см⁻²; $5 \cdot 10^{17}$ см⁻²; 10^{18} см⁻².

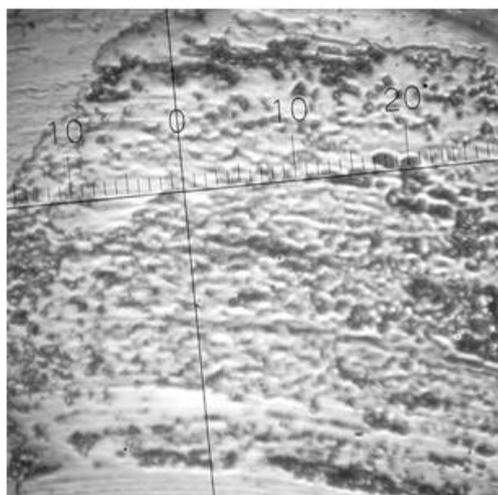
Микроструктура поверхностей трения игл в исходном состоянии и после ионной имплантации идентифицируется как мартенситная с различной дисперсностью мартенситных игл, что соответствует структуре стали У10 в состоянии после закалки и низкого отпуска.

Имплантирование ионов C^+ поверхности рабочей зоны иглы приводит к увеличению ее микротвердости, при этом максимальный упрочняющий эффект достигается на глубине индентирования $\sim 1,2$ мкм. Установлено, что с увеличением дозы облучения наблюдается усиление эффекта упрочнения материала поверхности в рабочей зоне иглы (рисунок 8а). Максимальное увеличение микротвердости в $\sim 1,6$ раза достигнуто при дозе облучения $D= 10^{18} \text{ см}^{-2}$.



а

б



в

Рисунок 6 – Фотографии износа рабочей поверхности скольжения игл:
а – после 5-ти производственных циклов; б – после 7-ми производственных циклов; в – после 17-ти производственных циклов

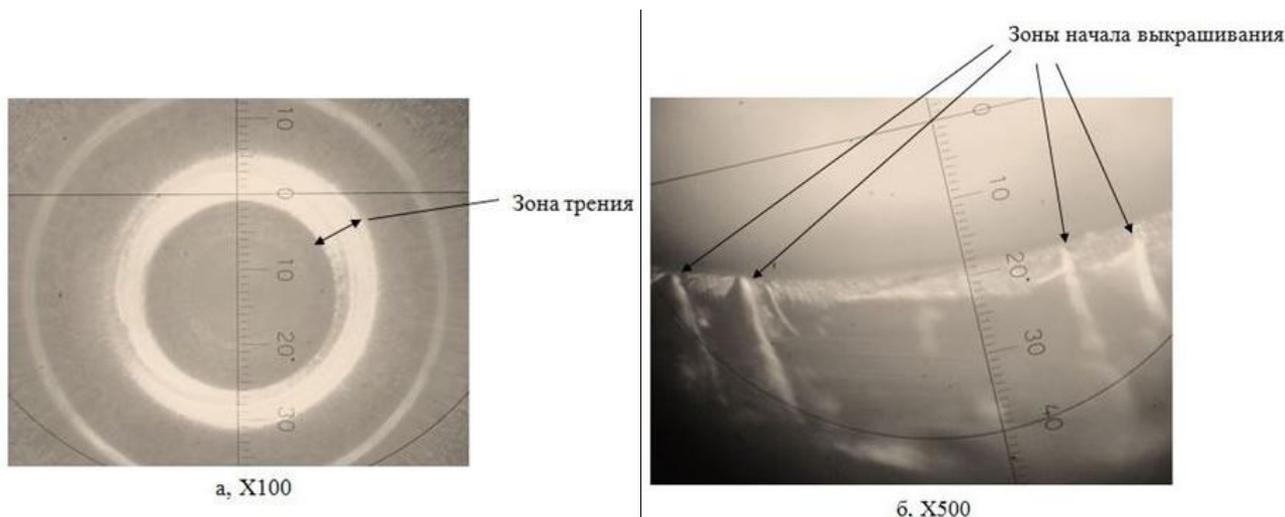


Рисунок 7 – Фотография рабочей поверхности (а) и профильное изображение поверхности трения (б) подпятника, отработавшего 5 производственных циклов

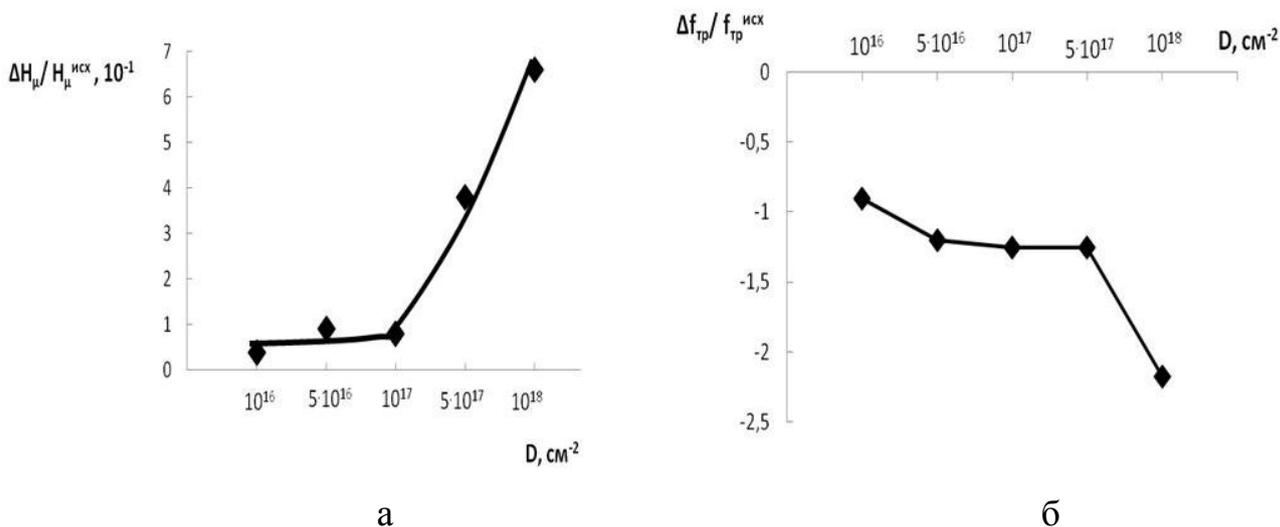


Рисунок 8 - Зависимости относительного изменения микротвердости на глубине индентирования $\sim 1,2$ мкм материала иглы (а) и относительного изменения коэффициента трения (б) от дозы облучения ионов C^+

Установлено, что ионная имплантация рабочей поверхности иглы способствует понижению коэффициента трения. Относительное изменение коэффициента трения модифицированной поверхности игл от дозы облучения представлено на рисунке 8б. Облучение иглы дозой ионов C^+ 10^{18}cm^{-2} приводит к уменьшению коэффициента трения рабочей поверхности в $\sim 1,3$ раза.

Максимальный упрочняющий эффект и уменьшение коэффициента трения рабочей части иглы достигается при ионной имплантации C^+ дозой 10^{18}cm^{-2} .

Новые конструкционные материалы, применяемые для изготовления подпятников, должны обладать совокупностью таких свойств, как высокая механическая прочность, износостойкость и трещиностойкость, химическая

инертность и работоспособность в условиях повышенных температур и дефицита смазки. Одним из перспективных материалов является материал нового поколения на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия. В работе предложена замена материала подпятника – лейкосапфира на диоксид циркония, стабилизированный 3%-ым оксидом иттрия.

Материалы подпятников из лейкосапфира и диоксида циркония имеют одинаковые значения микротвердости $H_{200} \sim 23$ ГПа, при этом материал диоксида циркония не склонен к проявлению микрохрупкости.

Фрикционные испытания (в интервале нагрузок 0,3 - 1 Н) при сухом скольжении инденторов – рабочих поверхностей новых и облученных дозой $D=10^{18}$ см⁻² ионов С⁺ игл по плоским поверхностям подпятников показал, что при контакте с подпятником из диоксида циркония коэффициент трения $f_{тр}$ пары в 1,5 раза меньше, чем при контакте с подпятником из лейкосапфира.

Испытания износостойкости материала исходных игл (сталь У10), а также игл после ионной имплантации, облученных по режиму – ионами С⁺ дозой 10^{18} см⁻², проводили в подпятниках из лейкосапфира и диоксида циркония в условиях смазки VM-1 в течение 10 минут при различных скоростях вращения. На рисунке 9 приведены зависимости линейной интенсивности изнашивания от скорости вращения игл в исследуемых подпятниках.

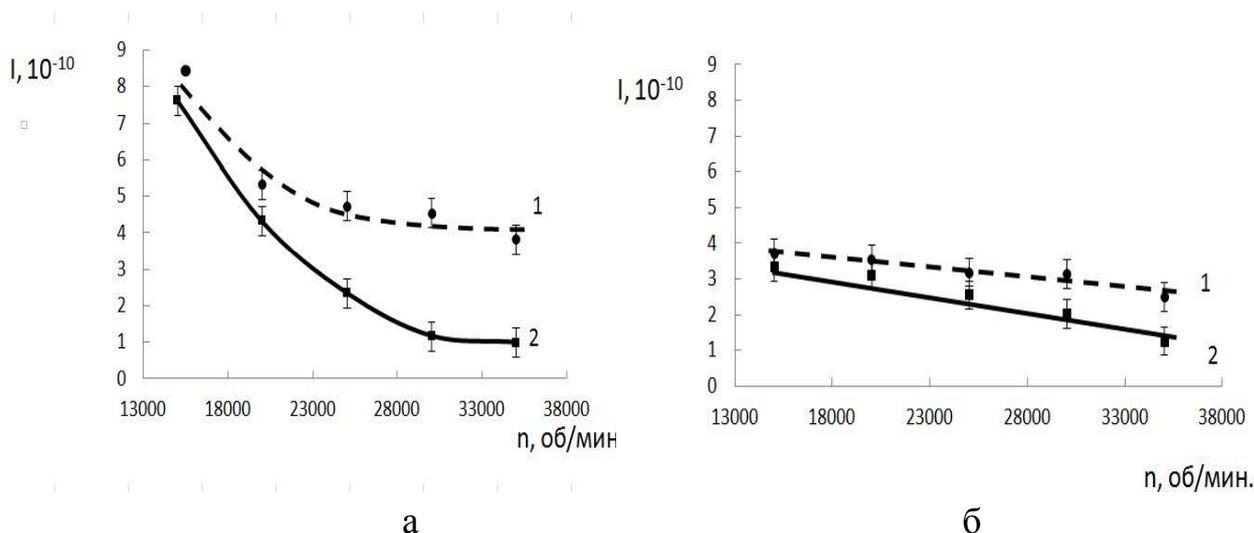


Рисунок 9 – Зависимости линейной интенсивности изнашивания новых (а) и облученных (б) игл от количества оборотов в подпятниках из лейкосапфира (1) и диоксида циркония (2)

Износостойкость новых игл при работе в паре с подпятником из диоксида циркония в 3 раза выше, чем при работе с подпятником из лейкосапфира, а облученных игл – в 1,9 раза.

По результатам исследований определена оптимальная доза ионной имплантации – 10^{18} см⁻², при которой достигается максимальный упрочняющий эффект и уменьшение коэффициента трения рабочей части иглы. Для пары трения «игла-подпятник» в качестве альтернативного материала для изготовления подпятников предложен диоксид циркония, стабилизированный

3 %-ым оксидом иттрия, который по всем механическим и трибологическим показателям превосходит лейкосапфир.

В четвертой главе показано практическое применение ионно-плазменного наноструктурированного покрытия нитрида титана в машиностроительной отрасли.

Разработка защищена патентом РФ на полезную модель №87228, подтверждена актами внедрения (ЗАО «ОКБ – Нижний Новгород» (г. Нижний Новгород), СГАУ им. С. П. Королёва (г. Самара)) и отзывами Заказчиков (ЗАО «ОКБ – Нижний Новгород» (г. Нижний Новгород)).

Выводы по работе:

1. Установлены причины преждевременного отказа и пониженной работоспособности деталей ответственных узлов трения газовой центрифуги – «полуось-подшипник» и «игла-подпятник».
2. Для повышения ресурса ответственного узла газовой центрифуги, а именно, пары трения «полуось-подшипник», разработан и научно обоснован метод поверхностного упрочнения стальной детали «полуось» посредством ионно-плазменного нанесения износостойкого покрытия нитрида титана.
3. Разработан технологический процесс ионно-плазменного нанесения (методом КИБ на установке ВУ2-МБС) износостойкого столбчатого наноструктурированного покрытия нитрида титана с оптимальным сочетанием эксплуатационных свойств.
4. При комплексном подходе к модернизации детали «полуось» пары трения «полуось-подшипник» осуществлена замена материала (сталь ХВГ на сталь Х12Ф1).
5. Результаты натурных испытаний пары трения «полуось-подшипник» в форсированном режиме (с изгибающим дисбалансом $5 \cdot 10^{-5}$ кг, боковой нагрузкой 48 Н в момент перехода вертикальным валом собственной частоты, окружной скорости – 11 м/с в условиях граничной смазки подшипника маслом VM-1) показали целостность покрытия во время всего цикла испытаний и его высокую износостойкость. Нанесение покрытия нитрида титана позволило увеличить количество безаварийных проходов через критические точки в 3 раза и увеличить при этом допустимый изгибающий дисбаланс полуоси во время ее балансировки в 1,5 раза. Разработка запатентована и внедрена на предприятиях машиностроительной отрасли для повышения работоспособности и надежности различных деталей пар трения.
6. Для повышения ресурса ответственного узла трения газовой центрифуги «игла-подпятник» разработан и научно обоснован метод поверхностного упрочнения стальной «иглы» посредством ионной имплантации ионами C^+ и замены материала «подпятника».
7. Оптимизирована технология ионно-лучевой обработки с целью достижения упрочняющего эффекта рабочей поверхности стальной «иглы» и определена доза ионной имплантации (ионов C^+), при которой достигается максимальный упрочняющий эффект с одновременным понижением коэффициента трения модифицированной рабочей поверхности детали.
8. На основе результатов комплексного подхода к модернизации пары трения

«игла-подпятник» предложено осуществить замену материала контртела из лейкосапфира на диоксид циркония, который обладает повышенной стойкостью к ударным нагрузкам.

9. За счет улучшения прочностных, фрикционных и пластических свойств поверхностей сопрягаемых деталей узел трения «игла-подпятник» обладает повышенной износостойкостью и трещиностойкостью при воздействии ударно-динамических нагрузок по сравнению со штатным узлом и может быть рекомендован для эксплуатации.

Список основных работ по теме диссертации

I. Публикации в журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Кривина, Л.А.** Оптимизация технологии нанесения ионно-плазменного покрытия нитрида титана на малогабаритные тонкостенные детали / Ю.П. Тарасенко, Л.А. Кривина, И.Н.Царева // Вестник Самарского Государственного Аэрокосмического Университета. – Самара, 2011. – № 3 (27) Ч.2. – С.170-174.

2. **Кривина, Л.А.** Использование наноструктурированного ионно-плазменного покрытия нитрида титана для повышения износостойкости плунжерных пар топливных насосов» / Ю.П. Тарасенко, Л.А. Кривина, Я.А. Фель // Известия Высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – №3. – с.142-148.

3. **Krivina L.A.** The adhesion solidity, physico-mechanical and tribological properties of the coating of titanium nitride / Krivina L.A., Tarasenko Y.P., Fel Ya. A. // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 857. – 2017. – 012024

4. **Кривина, Л.А.** Модификация поверхности скольжения детали высокоскоростной пары трения методом частотно-импульсной имплантации / Л.А. Кривина, И.Н.Царева // Вопросы материаловедения. – 2017. – № 2(90). – с.110-115.

II. Патенты:

5. **Кривина, Л.А.** Пара скольжения / Ю.П. Тарасенко, В.А. Сорокин, Л.А. Кривина // Патент РФ на изобретение №87228. – 2009.

III. Публикации в других научных журналах, сборниках научных трудов и трудах конференций:

6. **Кривина, Л.А.** Модификация поверхности скольжения стальной детали пары трения «игла-подпятник» / Ю.П. Тарасенко, В.А. Сорокин, Л.А. Кривина // Материалы XVII Международной конференции «Физика прочности и пластичности материалов». Самара, 2009. – Т.2. – с.1124-1131.

7. **Кривина, Л.А.** Анализ структуры и трибологических свойств полуосей из марок сталей ХВГ, Х12МФ, Х12Ф1/ Ю.П. Тарасенко, Л.А. Кривина, В.А. Сорокин // Сборник научных трудов «Прикладная механика и технологии машиностроения». Н.Новгород, 2010. – №2(17). – с.37-45.

8. **Кривина, Л.А.** Модернизация высокоскоростной пары трения / Ю.П. Тарасенко, Л.А. Кривина, В.А. Сорокин // Вестник научно-технического развития: Интернет-журнал, №2 (42), 2011. – 22.01.2011, регистрационный государственный №041100120/0007. www.vntr.ru. – с.39-44.

9. **Кривина, Л.А.** Оптимизация технологии нанесения ионно-плазменного покрытия нитрида титана на малогабаритные тонкостенные детали / Ю.П. Тарасенко, И.Н. Царева, Л.А. Кривина // Материалы докладов Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». Самара, 28-30 июня, 2011. – с.191-192
10. **Кривина, Л.А.** Модифицирование элементов пары трения «игла–подпятник» / В.А. Сорокин, Л.А.Кривина, Ю.П. Тарасенко, В.Н. Перевезенцев // Сборник статей: Современные технологии модифицирования поверхностей деталей машин. – М.:Ленанд. – 2013. – с.200-210.
11. **Кривина, Л.А.** Модернизация малогабаритного трибосопряжения газовой центрифуги К4110 // Л.А. Кривина, И.Н. Царева, Ю.П. Тарасенко // Сборник материалов докладов международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» Самара 22-24 июня 2016 г. – Ч. 1. – с. 119-120.
12. **Кривина, Л.А.** Модифицирование поверхности скольжения детали высокоскоростной пары трения газовой центрифуги К4110 / Л.А. Кривина, И.Н. Царева, Ю.П. Тарасенко // Сборник материалов докладов международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» Самара 22-24 июня 2016 г. – Ч. 1. – с. 120-121.
13. **Кривина, Л.А.** Адгезионная прочность, физико-механические и трибологические свойства покрытия нитрида титана / Л.А. Кривина, Ю.П. Тарасенко, Я.А. Фель // Материалы 13-ой Международной конференции «Пленки и покрытия – 2017». 18-20 апреля, 2017. – Санкт-Петербург, изд-во Политех. Университета. – 2017. – с.411-414.
14. **Кривина, Л.А.** Наноструктурированное ионно-плазменное покрытие нитрида титана для повышения ресурса деталей плунжерных пар топливных насосов // Л.А. Кривина, Ю.П. Тарасенко // Доклады V Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». 8-10 ноября 2017. – Москва, ИМАШ РАН. – с.121-122.
15. **Кривина, Л.А.** Поверхностное упрочнение детали высокоскоростной пары трения методом частотно-импульсной имплантации / Л.А. Кривина, И.Н.Царева // Доклады V Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». 8-10 ноября 2017. – Москва, ИМАШ РАН. – с.123-125.
16. **Кривина, Л.А.** Разработка ионно-плазменной технологии нанесения износостойкого покрытия нитрида титана для станкоинструмента / Ерофеев В.И., Кривина Л.А., Тарасенко Ю. П., Царева И.Н. // Станкоинструмент. – Москва, 2018. - №2.