

Леонтьев Андрей Львович

**Повышение долговечности  
плунжерных пар топливных насосов  
высокого давления судовых дизелей  
нанесением износостойких покрытий**

05.08.04 – Технология судостроения, судоремонта и  
организация судостроительного производства

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Владивосток – 2012

Работа выполнена в Морском государственном университете имени адмирала Г.И. Невельского

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Леонтьев Лев Борисович

Официальные оппоненты:

Гордиенко Павел Сергеевич — заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор, институт химии ДВО РАН,  
заведующий лабораторией защитных покрытий и морской коррозии

Погодаев Леонгард Иванович – заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук-\*, профессор, Санкт-Петербургский государственный  
университет водных коммуникаций, профессор кафедры технологии материалов  
и материаловедения

Ведущая организация Дальневосточный научно-исследовательский  
проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт  
морского флота (г. Владивосток)

Защита состоится 28 марта 2012 года в 16 часов  
на заседании диссертационного совета Д 223.005.01  
при Морском государственном университете имени адмирала Г.И. Невельского  
по адресу: 690059, Владивосток, Верхнепортовая, 50А, ауд. 241.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УК1  
Морского государственного университета им. адм. Г.И. Невельского.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Ученый секретарь  
диссертационного совета Резник Александр Григорьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Долговечность плунжерных пар топливных насосов высокого давления (ТНВД) судовых дизелей после их перевода на тяжелые сорта топлива не соответствует должному уровню качества и безотказности дизеля, в который они входят. Причины отказов и повреждений кроются в недостаточном уровне проектирования и конструирования, в ходе которых не всегда используются достижения науки, ограниченно применяются современные материалы и упрочняющие технологии.

Прецизионные детали топливной аппаратуры являются одними из наиболее ответственных и наименее долговечных узлов топливной аппаратуры судовых дизелей. Они работают в чрезвычайно сложных условиях: вибрации, высоких и переменных давлений, повышенных температур. Экономичность и надежность судовых дизелей в значительной степени зависит от технического состояния топливной аппаратуры (ТА). При эксплуатации дизелей происходит износ как плунжеров, так и втулок ТНВД. Износ этих деталей приводит к увеличению зазоров в сопряжении и, как следствие, — к потере гидроплотности. Анализ технической информации показал, что 70–90 % судовых дизелей имеют заниженную мощность при повышенном удельном расходе топлива из-за нестабильной работы ТА, что приводит к значительному перерасходу топлива.

Существующие технологические процессы (ТП) восстановления не обеспечивают требуемую долговечность плунжерных пар ТНВД, так как при их проектировании не учитываются комплексно технологические особенности методов нанесения покрытий и упрочнения, их технико-экономические показатели, а также условия эксплуатации деталей. Необеспечение требуемых показателей долговечности восстановленных плунжерных пар ТНВД предопределяет необходимость совершенствования ТП их восстановления, выбора критериальных параметров поверхностного слоя деталей, а также оценки долговечности восстановленных деталей в зависимости от полученных параметров материала поверхностного слоя.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. Проект: «Технологическое обеспечение долговечности судового оборудования: исследования и разработка технологий упрочнения и восстановления прецизионных деталей топливной аппаратуры». Государственный контракт № 16.740.11.0398 от 03 декабря 2010 г.

**Объектом исследования** является технологический процесс восстановления и упрочнения плунжерных пар ТНВД судовых дизелей.

**Целью работы** является повышение эффективности технической эксплуатации судовых дизелей путем применения технологического процесса восстановления и упрочнения плунжерных пар ТНВД, позволяющего получить оптимальный комплекс параметров материала износостойкого покрытия и обеспечить требуемую их долговечность при приемлемой экономической эффективности.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Устанавливались особенности изнашивания и причины отказов плунжерных пар ТНВД судовых дизелей, работающих на тяжелых сортах топлива.

2. Проводилось дальнейшее развитие методологии технологического обеспечения долговечности плунжерных пар ТНВД при восстановлении на основе системного проектирования, включающего оптимизацию параметров режимов обработки на основных технологических операциях, выбор минеральных и органоминеральных материалов для упрочнения рабочих поверхностей плунжерной пары, прогнозирование долговечности и оценку экономической эффективности технологических решений.

3. Исследовалось влияние диаметрального зазора в сопряжении «плунжер – втулка» на гидравлическую плотность и долговечность плунжерных пар ТНВД.

4. Определялись критериальные параметры композиционного покрытия плунжера, диаметрального зазора и гидравлической плотности плунжерных пар ТНВД, обеспечивающие заданную долговечность.

5. Исследовалось влияние параметров режима гальванического хромирования на микротвердость и триботехнические свойства покрытия для получения математических зависимостей и определения оптимальной области параметров режима для условий трения при наличии абразива в топливе.

6. Исследовалось влияние химического состава минеральных и органоминеральных материалов на механические и триботехнические свойства, структуру и топографию покрытия.

7. Исследовалось влияние параметров модифицирования гальванического хрома минеральными и органоминеральными материалами на триботехнические свойства пары трения «сталь ХВГ – износостойкое покрытие» для определения оптимального режима.

8. Исследовалось влияние температуры топлива на триботехнические свойства пары трения «сталь ХВГ – износостойкое покрытие».

9. Разрабатывался и внедрялся в производство ТП восстановления и упрочнения плунжерных пар ТНВД путем нанесения износостойкого композиционного покрытия на плунжер.

***Новые научные результаты***, полученные автором.

1. Установлены особенности изнашивания и причины отказов плунжерных пар ТНВД судовых дизелей, работающих на тяжелых сортах топлива.

2. Разработана методика технологического обеспечения долговечности плунжерных пар ТНВД при их восстановлении на основе системного проектирования, которое включает: оптимизацию параметров режимов обработки на основных технологических операциях, выбор минеральных и органоминеральных материалов для упрочнения рабочих поверхностей плунжерной пары, прогнозирование долговечности и оценку экономической эффективности технологических решений.

3. Установлены математические зависимости гидравлической плотности плунжерных пар ТНВД от диаметрального зазора в сопряжении «плунжер–втулка» и геометрических параметров золотниковой части плунжера.

4. Определены критериальные параметры композиционного покрытия плунжера, диаметрального зазора и гидравлической плотности плунжерных пар ТНВД, обеспечивающих заданную долговечность.

5. Получены математические зависимости влияния режима гальванического хромирования на микротвердость и триботехнические свойства покрытия в условиях трения при наличии абразива в топливе.

6. Установлено влияние химического состава минеральных и органоминеральных материалов на механические и триботехнические свойства, структуру и топографию покрытия.

7. Разработаны составы композиций минеральных и органоминеральных материалов для модифицирования гальванического хромового покрытия.

8. Получены математические зависимости триботехнических свойств композиционного покрытия от режима модифицирования гальванического хрома.

9. Установлено влияние температуры топлива на триботехнические свойства износостойких покрытий.

10. Установлено влияние механических свойств поверхностного слоя покрытия на коэффициент трения и износостойкость трибоузла.

11. Разработан ТП восстановления и упрочнения плунжерных пар ТНВД с использованием ресурсосберегающей технологии, обеспечивающей заданную долговечность.

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

Разработана методика: проектирования ТП восстановления плунжерных пар ТНВД, позволяющая прогнозировать долговечность и определять экономическую эффективность технологических решений; эффективного и технологичного контроля качества восстановленных плунжерных пар ТНВД.

Определены критериальные параметры композиционного покрытия и диаметрального зазора плунжерной пары.

Выполнены комплексные исследования композиционных покрытий на основе гальванического хрома, модифицированного минеральными и органоминеральными материалами с использованием современных методов: наноиндентирования, атомно-силовой микроскопии, сверхвысоковакуумной фотоэлектронной спектроскопии, рентгеновской дифрактометрии и др., позволившие разработать ТП восстановления плунжерных пар.

Получены результаты сравнительных стендовых испытаний плунжерных пар ТНВД с различными типами покрытий плунжеров.

Восстановленные плунжерные пары эксплуатируются на судах судоводных компаний: ЗАО «Фортуна Танкер» (г. Находка), ООО «Востокфлот» (г. Владивосток) и компания «Лонсейл Ассошиэйтид, С.А» и др., и имеют безотказную наработку свыше 14 тыс. ч для СОД и свыше 20 тыс. ч для МОД, работающих на тяжелых сортах топлива.

ТП восстановления плунжерных пар методом нанесения композиционных покрытий внедрена в ООО НПК «Моринтех» (г. Владивосток).

Разработанная методика проектирования восстановления и упрочнения поверхностей трения трибоузлов и апробированная при восстановлении

плунжерных пар может найти применение при необходимости повышения износостойкости и обеспечения заданной долговечности деталей машин, работающих в условиях абразивного изнашивания.

**Достоверность и обоснованность результатов** исследования обусловлены применением современных методов исследования структуры и свойств материалов и покрытий, подтверждена значительным объемом экспериментальных данных. Результаты аналитических исследований получены с использованием методов математического анализа, теории планирования эксперимента, корреляционно-регрессионного анализа и современных систем компьютерной математики (Excel, Matcad и др.). Часть исследований выполнена в специализированных лабораториях ведущих академических институтов и вузов. Достоверность результатов подтверждена промышленным апробированием разработанного ТП, натурными испытаниями, а также положительными решениями и рекомендациями по обсуждаемым докладам автора на конференциях и семинарах.

**Апробация работы.** Основные результаты работы доложены, обсуждены и одобрены на: Восьмой международной научно-практической конференции «Проблемы транспорта Дальнего Востока» (Владивосток, октябрь 2009 г.), 57-ой международной молодежной научно-технической конференции «Молодежь-наука-инновации» (Владивосток, ноябрь 2009 г.), Научной конференции «Вологдинские чтения» (Владивосток, ноябрь 2010 г.), 58-ой международной молодежной научно-технической конференции, посвященной 120-летию морского образования в Приморском крае (Владивосток, ноябрь 2010 г.), 13-ой Международной научно-практической конференции «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня» (Санкт-Петербург, апрель 2011 г.), 59-ой международной молодежной научно-технической конференции «Молодежь-наука-инновации» (Владивосток, ноябрь 2011 г.), VII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Perspektywiczne opracowania są nauką i technikami - 2011» (Przemysł, декабрь 2011 г.), Международной научно-практической конференции «Современные материалы, техника и технология» (Курск, декабрь 2011 г.).

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 7 статьях, в том числе 3 статьях в рецензируемых научных изданиях, 10 докладах.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа изложена на 178 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 173 наименований и 5 приложений. Работа содержит 23 таблицы и 49 рисунков.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, научная новизна и практическая ценность работы, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В *первой главе* изложено состояние проблемы, сформулированы цель и основные задачи исследования, приведены: сведения о влиянии износа плунжерных пар ТНВД на рабочие характеристики дизеля и условий работы плунжерных пар на их долговечность, причины отказов и дефекты плунжерных пар ТНВД судовых дизелей, применяемые методы восстановления плунжерных пар; дан анализ технологических возможностей способов гальванического хромирования деталей и эксплуатационных свойств получаемых покрытий, приведены сведения о долговечности восстановленных плунжерных пар ТНВД судовых дизелей и пути ее повышения.

Предпосылкой для успешного проведения исследований являются фундаментальные работы ученых:

– в области трения и изнашивания: А.К. Зайцева, Д.Н. Гаркунова, Н.А. Буше, Э.Д. Брауна, В.И. Костецкого, И.В. Крагельского, Н.К. Мышкина, Л.И. Тушинского, М.М. Хрущева, В. Пекошевски, Х. Чихоса и др.;

– в области использования минеральных материалов для повышения износостойкости узлов трения: В.В. Зуева, Ю.Г. Лаврова, С.Ю. Лазарева, Л.И. Погодаева, В.Н. Половинкина, Ю.В. Холопова и др.

На основании анализа литературных источников установлено, что существующие ТП восстановления не обеспечивают требуемую долговечность плунжерных пар ТНВД, так как при их проектировании не учитывается комплексно технологические особенности методов нанесения покрытий и упрочнения, их технико-экономические показатели, а также условия эксплуатации деталей.

Необеспечение требуемых показателей долговечности восстановленных плунжерных пар ТНВД предопределяет необходимость совершенствования ТП восстановления, а также выбора критериальных параметров поверхностного слоя деталей.

На основании проведенного в первой главе диссертации анализа сформулирована цель работы и обоснованы задачи исследования.

Во *второй главе* представлены программа и методики проведения исследования: использования регрессионного анализа и планирования экспериментов, определения геометрических параметров и гидравлической плотности плунжерных пар, триботехнических свойств материалов; исследования механических свойств покрытий на микро- и наноуровне, структуры и топографии поверхностей трения плунжеров и различных покрытий, рентгенофазного анализа покрытий и ускоренных стендовых испытаний плунжерных пар ТНВД.

Исследования триботехнических свойств покрытий проводили на универсальной машине трения модели УМТВК производства АО «АвтоВАЗ» (г. Тольятти) по схеме «ролик–ролик» при постоянной скорости скольжения 0,71 м/с. Для триботехнических испытаний образцы изготавливали из стали ХВГ в форме роликов диаметром 45 мм, шириной 10 мм, часть образцов покрывали хромовым покрытием толщиной 12-15 мкм. Перед проведением испытаний образцы полировали алмазной пастой до  $Ra \leq 0,063$  мкм. В качестве неподвижного образца использовался ролик из стали ХВГ твердостью 60–61 НРС. Время испытаний каждой пары трения составляло четыре часа. На-

грузка изменялась от 100 до 500 Н. Испытания проводили с искусственным загрязнителем в смазке. В качестве искусственного загрязнителя использовалась кварцевая пыль дисперсностью 1–5 мкм. Концентрация загрязнителя в топливе составляла 1%. Смазку пары трения осуществляли капельным способом (50–55 капель в минуту). Для смазки применялось дизельное топливо марки Л-0,5 по ГОСТ 305-82.

Для исследования механических свойств покрытий на наноуровне использовали ультрамикротестер для динамических испытаний твердости материалов DUN-211S фирмы Shimadzu (Япония). Прибор предназначен для измерения твердости, модуля упругости и упругого восстановления по методу наноиндентирования. Испытания соответствуют стандарту ISO 14577-4.

Морфологию покрытий исследовали на сканирующем зондовом (атомно-силовом) микроскопе SPM-9600 фирмы Shimadzu (Япония) с высоким пространственным разрешением.

Структурный, качественный и количественный анализ кристаллических фаз, а также фазовую идентификацию покрытий проводили на рентгеновском дифрактометре Advance-D8 фирмы «Bruker» (Германия).

Исследование химических соединений, образующихся при модификации поверхности минеральными органоминеральными материалами, проводили на сверхвысоковакуумном фотоэлектронном спектрометре Omicron (Германия).

Сравнительные ускоренные испытания для определения динамики износа плунжерных пар с различными видами покрытий проводили на специальном стенде, конструкция которого позволяет испытывать в одинаковых условиях одновременно четыре плунжерные пары. В качестве объекта исследования был взят блочный ТНВД двигателя Ч 10,5/13. Испытания проводили с искусственным загрязнителем в топливе марки Л-0,5. В качестве искусственного загрязнителя использовалась кварцевая пыль дисперсностью 1–5 мкм. Концентрация загрязнителя в топливе составляла 1%.

В *третьей главе* изложено экспериментально-теоретическое обоснование восстановления плунжерных пар ТНВД нанесением композиционных износостойких покрытий.

Анализ причин отказа плунжерных пар проводился с использованием уравнения для гидродинамического расчета топливоподачи, так как отказ пары наступает в тот момент, когда давление топлива, создаваемое парой топливного насоса, недостаточно из-за протечек и не обеспечивает качественный впрыск топлива в цилиндр. Динамика нарастания давления топлива в надплунжерной полости ТНВД оказывает наибольшее влияние на процесс топливоподачи в момент перекрытия плунжером впускного отверстия втулки, т. е. в начале подачи топлива, когда его давление растет, но еще недостаточно для поднятия нагнетательного клапана, а утечки топлива максимальны, описывается уравнением

$$\frac{dP_n}{dt} = \frac{1}{\beta V_n} \left( f \frac{dh_n}{dt} - Q_{yn} \right), \quad (1)$$



где  $P_n$  – давление топлива в надплунжерной полости;  $t$  – время;  $\beta$  – коэффициент сжимаемости топлива;  $V_n$  – объем надплунжерной полости;  $f$  – площадь поперечного сечения плунжера;  $h_n$  – ход плунжера;  
 $Q_{yn} = \frac{0,036d_n(\delta_n + 0,652 \cdot 10^{-13} p_{ni})^3}{\mu l_n}$  – утечки топлива для клапанного ТНВД;

$d_n$  – диаметр плунжера;  $\delta_n$  – диаметральный зазор в плунжерной паре;  $l_n$  – длина компрессионной части плунжера;  $p_{ni}$  – давление топлива в надплунжерной полости плунжера в расчетном интервале времени  $\Delta t$ ;  $\mu$  – динамическая вязкость топлива.

О процессах, происходящих в топливной системе при эксплуатации дизеля, на основании анализа уравнения (1) можно сделать выводы:

1. при постоянной частоте вращения коленчатого вала нарастание давления в надплунжерной полости зависит только от величины утечек, т.к. все остальные параметры одинаковы;

2. нарастание давления в надплунжерной полости прямо пропорционально скорости плунжера, поэтому на режимах с малой частотой вращения коленчатого вала давление будет меньше, а величина утечек больше, соответственно цикловая подача топлива меньше;

3. величина утечки топлива зависит в большей степени от диаметрального зазора в плунжерной паре и давления в надплунжерной полости (причем эта зависимость кубическая), т. е. по мере изнашивания сопряженных поверхностей в головной части плунжера величина утечек будет резко возрастать;

4. по мере увеличения величины диаметрального зазора в плунжерной паре наступит момент, когда давление топлива, создаваемое парой топливного насоса, будет недостаточным из-за протечек и не обеспечит качественный впрыск топлива в цилиндр, а на пусковых режимах из-за утечек давление в надплунжерной полости будет недостаточным для открытия форсунок, и двигатель не будет запускаться. Следовательно, диаметральный зазор в плунжерной паре, величина локальных дефектов в районах наполнительного и отсечного отверстий втулки и скорость изнашивания трибосопряжения являются критериальными параметрами.

Долговечность плунжерных пар определяется ресурсом до достижения предельно допустимого зазора в сопряжении. Требуемый ресурс плунжерных пар для МОД составляет не менее 20 тыс. ч (половина ресурса до капитального их ремонта), для СОД, работающих на тяжелых сортах топлива, — не менее 14 тыс. ч (наработка на отказ быстроизнашиваемых деталей СОД).

Проблему обеспечения заданной долговечности деталей плунжерных пар решали на основе применения системного проектирования. С позиции теории управления плунжерная пара представляет собой в системе «технология – плунжерная пара – эксплуатация» объект состояния, в который входят следующие блоки: входные параметры, процессы и выходные параметры. По сравнению с методологией Х. Чихоса и В. Пекошевски, в данной работе более полно определены входные факторы, которые поделены на три категории – технологические, эксплуатационные и помехи. Такое разделение позволяет в

явном виде выделить влияние технологических параметров на трущиеся элементы системы.

Разработана блок-схема проектирования технологии восстановления и упрочнения плунжерных пар нанесением композиционного покрытия, включающая следующие этапы: определение критериальных параметров, оптимизация параметров процесса хромирования, выбор способа механической обработки втулки и плунжера, выбор материала для модифицирования хромового покрытия, выбор способа упрочнения, оптимизация процесса упрочнения, предварительный выбор ТП на основе результатов прогнозирования ресурса восстановленной плунжерной пары и анализа стоимости восстановления, принятие решения и реализация решения.

Исследования особенностей изнашивания плунжерных пар ТНВД дизелей, работающих на тяжелых сортах топлива, позволили установить.

1. Втулки и плунжеры изнашиваются неравномерно. Доминирующим видом изнашивания является абразивное. Наибольший износ плунжера и втулки наблюдается в верхней части, при этом величина износа плунжера больше износа втулки в 3,2–5,5 (в среднем в 4,2) раза.

2. Наибольшая величина износа наблюдается в период приработки. По мере возрастания зазора в плунжерной паре скорость абразивного изнашивания уменьшается.

3. Для части втулок плунжерных пар ТНВД СОД характерны местные износы в районах наполнительного и отсечного отверстий, глубина которых может достигать 14–15 мкм. Причина образования местных износов в районах наполнительного и отсечного отверстий — кавитационно-эрозионное изнашивание. Причем при величине зазора в районах наполнительного и отсечного отверстий 15 мкм и менее местные износы, как правило, не образуются. По мере изнашивания сопряженных поверхностей и возрастания зазора в данном районе интенсивность кавитационно-эрозионного изнашивания втулок возрастает и значительно увеличивается площадь местного износа вокруг отверстий (от 3 до 5 раз).

4. Гидроплотность плунжерных пар зависит от диаметального зазора в паре и при испытании на стенде дизельным топливом вязкостью 4,6 сСт при температуре  $20 \pm 2$  °С (падение давления с 200 до 100 МПа) для плунжеров с размерами золотниковой части  $l_3 = 17\text{--}20$  мм,  $d_{\text{п}} = 19\text{--}23$  мм описывается полиномом третьей степени

$$t = 56,407 - 0,0102\delta^3 + 0,518\delta^2 - 9,028\delta, \text{ с} \quad (2)$$

для плунжеров с размерами золотниковой части  $l_3 = 33\text{--}36$  мм,  $d_{\text{п}} = 28\text{--}33$  мм описывается полиномом второй степени

$$t = 38,780 + 0,032\delta^2 - 2,149\delta, \text{ с} \quad (3)$$

где  $\delta$  – диаметральный зазор в плунжерной паре, мкм.

5. Контроль качества восстановленных плунжерных пар можно осуществлять на стенде для определения гидроплотности, т. к. по результатам испытаний можно оценить величину диаметального зазора и наличие местных износов.

Для увеличения долговечности плунжерных пар МОД до 20 тыс. ч, а СОД, работающих на тяжелых сортах топлива, до 14 тыс. ч необходимо уменьшить скорость изнашивания поверхностей трения в 1,4 раза. Для обеспечения вероятности безотказной работы  $P(t) = 0,9$  для плунжерных пар МОД 20 тыс. ч, а СОД 14 тыс. ч скорость изнашивания поверхностей трения следует уменьшить в 2,1 раза. Кроме того, необходимо контролировать зазор в плунжерной паре. Величины оптимальных зазоров плунжерных пар для работы на тяжелом топливе приведены в табл. 1.

Существенное превышение зазоров, указанных в табл. 1, приводит к резкому снижению гидроплотности и долговечности плунжерных пар.

Таблица 1

Зазоры плунжерных пар для работы на тяжелом топливе

Номинальный диаметр плунжера, мм	15–20	20–25	25–35	35–45	> 45
Минимальный зазор, мкм	4	6	8	10	12
Величина оптимальной гидроплотности, с	25–45	25–45	25–45	20–45	20–45
Величина наименьшей допустимой гидроплотности, с	20	20	20	15	15

На основании анализа эксплуатационных свойств покрытий, получаемых при использовании геоматериалов, и применяемых для упрочнения поверхностей трения, были выбраны следующие минеральные и органоминеральные материалы для создания на их основе оптимальной триботехнической композиции для модифицирования хромового покрытия: серпентинит (брутто-формула:  $Mg \cdot Fe_{0,8} \cdot Al_{0,4} \cdot Si_{2,1} O_9 \cdot H_2O \cdot (CaSiO_3)_{0,9}$ ), силикат природного происхождения (брутто-формула:  $Mg \cdot Fe_{0,8} \cdot Al_{0,4} \cdot Si_{2,1} O_9 \cdot H_2O \cdot (CaSiO_3)_{0,9}$ ), кварц ( $Si_2O$ ), силикат природного происхождения, модифицированный полисахаридом природного происхождения (брутто-формула полисахарида:  $(C_6O_4H_7NH_2)_n$ ).

В четвертой главе приведены исследования свойств износостойких покрытий и выбор оптимальных технологических параметров их нанесения.

Исследование влияния параметров режима хромирования на микротвердость и триботехнические свойства покрытия проводили с использованием метода полного факторного эксперимента. На основании литературного анализа свойств покрытий, получаемых в универсальном серноокислом электролите, были выбраны уровни факторов и интервалы варьирования, приведенные в табл. 2.

В качестве функций отклика выбраны величины изнашивания вращающегося хромированного и неподвижного стального образцов за время испытаний, определяющие долговечность трибосопряжения, а также микротвердость хрома, которая определяет износостойкость трибосопряжения.

В результате исследований получены зависимости величин износа от параметров режима нанесения хромового покрытия (4) и сопряженного стального образца из стали ХВГ (5) для условий трения при наличии абразива в топливе

$$J_{\text{п}} = 8,1 + 0,13t - 0,17i, \text{ мг}, \quad (4)$$

$$J_{\text{н}} = 23,6 + 0,13t - 0,34i, \text{ мг}. \quad (5)$$

Таблица 2

Уровни факторов и интервалы их варьирования

Наименование фактора	Уровни факторов			Интервал варьирования
	нижний -1	основной 0	верхний +1	
Температура электролита $t$ , °С	50	54	58	4
Плотность тока $i$ , А	50	55	60	5

Наибольшее влияние на износ покрытия оказывает плотность тока (4). С увеличением плотности тока величина износа уменьшается. Несколько меньшее влияние на величину износа оказывает температура электролита, по мере ее возрастания износ увеличивается. Наибольшей износостойкостью обладают покрытия, полученные при температуре электролита 50 °С и максимальной плотности тока в исследуемом интервале – 60 А/дм<sup>2</sup>. Хром, нанесенный на оптимальных параметрах режима хромирования, обеспечивает минимальные коэффициент трения и температуру в зоне контакта трибосопряжения.

Установлено, что величина микротвердости гальванического хрома зависит от параметров режима хромирования и описывается выражением

$$H_{\mu} = 9840 + 140t - 78i - ti, \text{ МПа}. \quad (6)$$

Наибольшее влияние на микротвердость покрытия оказывает плотность тока (6). С увеличением плотности тока величина микротвердости уменьшается. Несколько меньшее влияние на величину микротвердости оказывает температура электролита, по мере ее возрастания микротвердость увеличивается. Наибольшей износостойкостью обладают покрытия, имеющие минимальную микротвердость в исследуемом диапазоне параметров режима (9120–9210 МПа) и полученные при температуре электролита 50 °С и максимальной плотности тока в исследуемом интервале – 60 А/дм<sup>2</sup>.

Для определения оптимального состава минеральных и органоминеральных материалов для модифицирования хромового покрытия и обеспечения заданной долговечности плунжерных пар были проведены триботехнические испытания. Сначала исследовались вещества, которые нашли применение для создания износостойких покрытий или могут найти применение в составе композиций материалов: серпентинит (состав №1), силикат природного происхождения (состав №2), кварц (состав №3) и силикат природного проис-

хождения, модифицированный полисахаридом природного происхождения (композиция №4).

В результате сравнительных триботехнических испытаний установлено.

1) Модифицирование поверхностного слоя гальванического хрома позволяет уменьшить износ покрытия и сопряженной детали, при этом величины износа существенно зависят от состава модификатора.

2) Минимальный износ покрытия (28,4%) наблюдается после упрочнения хрома силикатом природного происхождения, при этом износ сопряженной детали 76,5% базового варианта (рис. 1).

4) Упрочнение хрома серпентинитом позволяет получить износ покрытия 31,4% при минимальном износе сопряженной детали — всего 47%.

5) Упрочнение хрома кварцем незначительно уменьшает его износ (всего на 4%), но снижает износ сопряженной детали до 52,9%.

На втором этапе исследований создавались композиции из следующих материалов: серпентинита (50% по массе) и силиката природного происхождения (50% по массе) – композиция №5, серпентинита (50% по массе) и силиката природного происхождения, модифицированного полисахаридом природного происхождения – композиция №6.

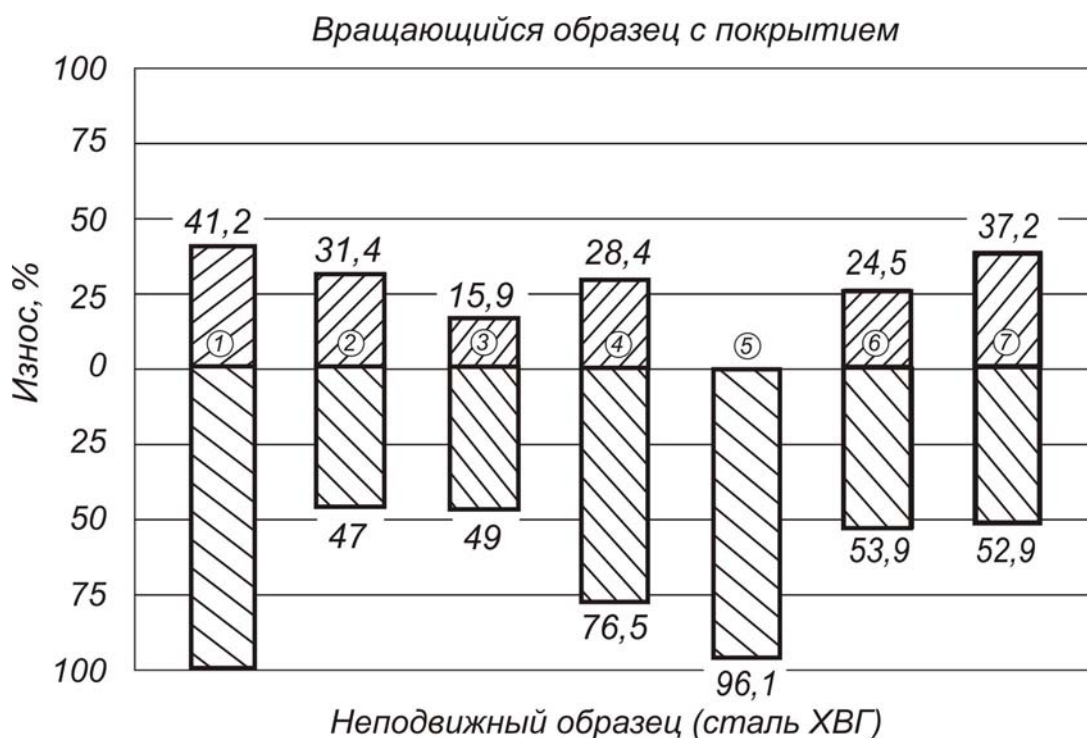


Рис. 1. Износ при испытании по схеме «ролик – ролик» в условиях трения при граничной смазке для трибосопряжения (время испытаний 4 ч):

1 – ХВГ – хром; 2 – ХВГ – хром, модифицированный составом №1 (серпентинитом); 3 – ХВГ – хром, модифицированный композицией №5;

4 – ХВГ – хром, модифицированный составом №2; 5 – ХВГ – хром, модифицированный композицией №4; 6 – ХВГ – хром, модифицированный композицией №6; 7 – ХВГ – хром, модифицированный составом №3 (кварцем)

Минимальный суммарный износ сопряжения наблюдается при использовании композиции № 5 и составляет всего 46% от суммарного износа базового варианта сопряжения (ХВГ – Cr), причем износ модифицированного хрома меньше немодифицированного в 2,6 раза.

Применение композиции № 6 приводит к износу модифицированного образца только при нагрузке 500 Н (уменьшается его вес). Износ неподвижного образца составляет 53,9% от износа базового варианта (ХВГ – хром).

Наиболее высокая температура во всем диапазоне нагрузок в зоне трибоконтакта наблюдается у пары трения ХВГ–хром. Модифицирование поверхности любой композицией материалов уменьшает температуру в зоне трения на 8–10% в зависимости от состава триботехнической композиции и нагрузки, действующей на трибосистему. Однако наиболее низкая температура в зоне трибоконтакта во всем диапазоне нагрузок наблюдается при модифицировании композицией №6.

Для нахождения оптимального содержания серпентинита в композициях №5 и №6 были проведены дополнительные испытания. Установлено, что минимальный износ покрытия и сопряженной детали из стали ХВГ наблюдается после упрочнения хромового покрытия композицией 90% серпентинита + 10% силиката природного происхождения, модифицированного полисахаридом природного происхождения — суммарная величина износа трибосопряжения 2,2 мг. Затем по износостойкости следует композиция, содержащая 90% серпентинита + 10% силиката природного происхождения — суммарная величина износа трибосопряжения 2,7 мг.

Наименьшие величины коэффициентов трения ( $k_{тр} = 0,120–0,122$ ) и время приработки имеют композиции: хром, упрочненный серпентинитом; хром, упрочненный серпентинитом, модифицированным полисахаридом и хром, упрочненный композицией 90% серпентинита + 10% силиката, модифицированного полисахаридом.

Для выбора оптимальных параметров модифицирования гальванического хрома минеральными и органоминеральными материалами были проведены исследования с использованием метода полного факторного эксперимента. Основными параметрами модифицирования осадков хрома фрикционным методом являются: приведенное усилие прижатия индентора к упрочняемой поверхности  $P_n$  и время упрочнения  $t$ . Линейная скорость упрочняемой поверхности была постоянной и составляла 0,71 м/с. Толщина хрома на образцах составляла 12–15 мкм, которая необходима для восстановления плунжерных пар в соответствии с разработанной технологией.

На основании литературного анализа по получению металлокерамических покрытий и серии предварительных экспериментов были выбраны уровни факторов и интервалы варьирования, приведенные в табл. 3.

Триботехнические испытания проводили при нагрузке 50 Н/мм в течение 3 ч, так как при меньших нагрузках износ покрытия практически отсутствует. Предварительно образцы прирабатывались после упрочнения при нагрузке 30 Н/мм в течение 5 мин. В качестве функций отклика выбраны вели-

чины скорости изнашивания композиционного покрытия и стального образца. Для получения композиционного покрытия использовали состав 90% серпентинита + 10% силиката, модифицированного полисахаридом.

В результате исследований получены зависимости величин скоростей изнашивания композиционного покрытия (7) и сопряженного образца из стали ХВГ (8) от параметров режима упрочнения хромового покрытия

$$V_{\text{п}} = 1,72 + 0,011t - 0,035P_{\text{п}}, \text{ мг/ч}, \quad (7)$$

$$V_{\text{н}} = 2,27 + 0,076t - 0,029P_{\text{п}} - 0,00125P_{\text{п}}t, \text{ мг/ч}. \quad (8)$$

Таблица 3

Уровни факторов и интервалы их варьирования

Наименование фактора	Уровни факторов			Интервал варьирования
	нижний -1	основной 0	верхний +1	
Усилие прижатия индентора к упрочняемой поверхности $P_{\text{п}}$ , Н/мм	20	30	40	10
Время упрочнения $t$ , мин	1	5,5	10	4,5

Наибольшее влияние на скорости изнашивания покрытия и сопряженной стали ХВГ оказывает усилие прижатия индентора к упрочняемой поверхности. С увеличением усилия прижатия величины скоростей изнашивания уменьшаются. Несколько меньшее влияние на величины скоростей изнашивания оказывает время упрочнения, по мере его возрастания скорости изнашивания увеличиваются. Оптимальным по всем триботехническим параметрам является режим упрочнения, при котором усилие прижатия индентора к упрочняемой поверхности 40 Н/мм и время упрочнения 1 мин.

Ступенчатая схема увеличения усилия прижатия индентора к упрочняемой поверхности с интервалом 10 Н/мм от минимальной величины усилия 10 Н/мм до 40 Н/мм и времени воздействия при каждой нагрузке в течение 1 мин позволяет увеличить износостойкость покрытия по сравнению с упрочнением на максимальной нагрузке прижатия индентора к детали в 1,4 раза. Зависимость скорости изнашивания композиционного покрытия от максимального усилия прижатия индентора к упрочняемой поверхности при ступенчатой схеме упрочнения имеет вид

$$V_{\text{п}} = 2,17 + 0,0006P_{\text{п}}^2 - 0,073P_{\text{п}}, \text{ мг/ч}. \quad (9)$$

Исследования микроструктур поверхностного слоя различных покрытий позволили установить, что осадки хрома характеризуются наличием на поверхности сетки микротрещин и пор, которые соединяются между собой, образуя дорожки, и участков с остроконечными пирамидами (рис. 2а). Модифицирование поверхности хромовых осадков минеральными и органоминеральными материалами приводит к образованию композиционного покрытия, которое заполняет поры и впадины между вершинами кристаллитов

хрома. Модифицирование гальванического хрома минеральными и органоминеральными материалами позволяет получить металлокерамический или металлоорганокерамический слой толщиной около 3 мкм. Исследование композиционных покрытий с помощью рентгено-электронной спектроскопии позволило установить состав металлокерамической пленки на глубине до 100 нм при упрочнении хрома композицией 90% серпентинита + 10% природного силиката, модифицированного полисахаридом (в атомных процентах): C = 56.23, O = 21.83, Cr = 10.89, Si = 3.78, Al = 4.93, Na = 1.78, Mn = 0.33, Fe = 0.23.

Оптимальной топографией, обеспечивающей минимальную удельную нагрузку на поверхность вследствие увеличения опорной длины профиля, обладает поверхность хрома после ее упрочнения композицией 90% серпентинита + 10% природного силиката, модифицированного полисахаридом (рис. 2, б). Минимальные параметры шероховатости получаются после модифицирования гальванического хрома органоминеральными материалами.

Исследования по влиянию температуры подогрева топлива в диапазоне температур 20–100 °С на износостойкость позволили установить, что модифицирование поверхности хрома минеральными и органоминеральными материалами позволяет повысить износостойкость сопряжения «сталь ХВГ – композиционное покрытие», снизить величины коэффициентов трения и температуры в зоне трибоконтакта. Наиболее высокими триботехническими свойствами обладает композиционное покрытие — хром, упрочненный композицией 90% серпентинита + 10% силиката, модифицированного полисахаридом.

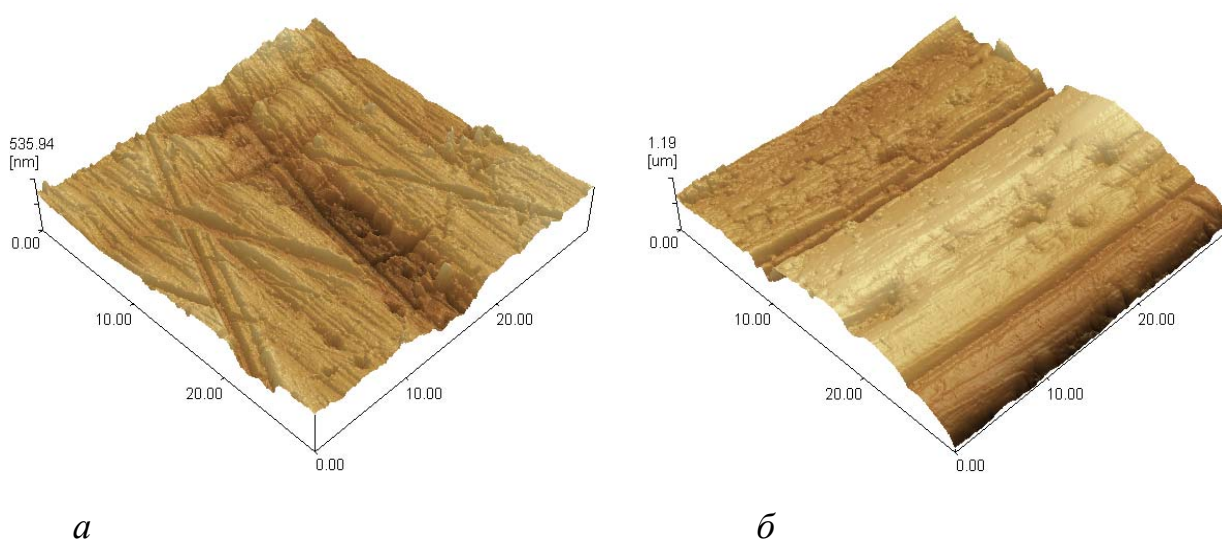


Рис. 2. Топография поверхностей плунжеров ТНВД после хромирования *а* и упрочнения композицией 90% серпентинита + 10% природного силиката, модифицированного полисахаридом *б*

Для анализа эксплуатационных свойств покрытия определяют отношение  $P$  к  $S^2$ , которое не зависит от глубины отпечатка и контактной площади и, по мнению Ю.И. Головина, хорошо коррелирует с некоторыми трибологическими характеристиками и определяется по формуле



$$\frac{P}{S^2} = 0,734 \frac{\pi H}{E^2},$$

где  $H$  – динамическая твердость,  $E$  – модуль упругости.

Установлено, что отношение  $P/S^2$  зависит от состава покрытия и оказывает существенное влияние на коэффициент трения, скорости изнашивания покрытия и сопряженной детали, поэтому управлять трибологическими свойствами в направлении их улучшения можно путем увеличения микротвердости и уменьшения модуля упругости покрытия. Оптимальный диапазон отношения  $P/S^2$  — 1,65–1,90, который обеспечивается при модуле упругости в диапазоне  $(1,82–2,11) \times 10^5$  Н/мм<sup>2</sup> и динамической микротвердости 1098–1067 HV. Наиболее рационально уменьшать модуль упругости покрытия путем модифицирования серпентинита или силиката природным полисахаридом, при этом динамическая микротвердость композиционного покрытия уменьшается незначительно.

В *пятой главе* приведен ТП восстановления плунжерных пар нанесением композиционных покрытий, стендовые ускоренные и эксплуатационные испытания плунжерных пар и оценка эффективности восстановления плунжерных пар нанесением композиционных покрытий.

Основные технологические операции при восстановлении плунжерных пар нанесением композиционных покрытий:

1. Гальваническое хромирование проводят при плотности тока 60 А/дм<sup>2</sup> и температуре электролита 50 °С. При плотности тока 60 А/дм<sup>2</sup> и температуре электролита 50°С за 15–20 мин получается покрытие требуемой толщины — 12–15 мкм.

2. Совместная притирка производится на доводочных бабках вручную.

3. Модифицирование слоя хрома фрикционным методом. Усилие прижатия индентора ступенчато увеличивается от 10 до 40 Н/мм с шагом 10 Н/мм. Время воздействия при каждой нагрузке 1 мин. Модифицирующий состав, состоящий из минерального или органоминерального материала, предварительно размещивается в дизельном топливе в пропорции 60% модификатора и 40% топлива и наносится на упрочняемую поверхность. В процессе упрочнения данная смесь подается в зону трения каждые 15–20 с капельным методом.

4. Контроль качества прецизионных пар осуществляется путем определения плотности плунжерных пар на специальном стенде.

Основной задачей ускоренных стендовых испытаний являлось определение долговечности восстановленных плунжерных пар с различными износостойкими покрытиями по сравнению с серийными. Для сравнительных ускоренных испытаний были взяты следующие опытные плунжерные пары:

- новая плунжерная пара двигателя Ч 10,5/13 (эталон);
- плунжерная пара с хромированным плунжером;
- плунжерная пара с хромированным плунжером и упрочненным композицией 90% серпентинита + 10% силиката природного происхождения;

– плунжерная пара с хромированным плунжером и упрочненным композицией 90% серпентинита + 10% силиката, модифицированного полисахаридом.

Анализ долговечности плунжерных пар проводили по изменениям цикловой пусковой подачи топлива и давления топлива в топливопроводе высокого давления на пусковых оборотах. После испытаний определяли величины износа плунжерных пар и их гидравлическую плотность на стенде. Ресурсные испытания плунжерных пар проводили в течение 40 ч при номинальном числе оборотов кулачкового вала, соответствующем номинальной частоте вращения коленчатого вала двигателя —  $25 \text{ с}^{-1}$  ( $1500 \text{ мин}^{-1}$ ).

Анализ результатов стендовых испытаний серийной плунжерной пары и пар с различными износостойкими покрытиями позволил установить:

– минимальный износ наблюдается у плунжерных пар, восстановленных с использованием композиционных покрытий: износ пары с покрытием плунжера хромом, упрочненным композицией 90% серпентинита + 10% силиката, модифицированного полисахаридом примерно в 2,8 раза меньше, чем у серийных и 2,2 раза меньше, чем хромированных; износ пары с покрытием плунжера хромом, упрочненным композицией 90% серпентинита + 10% силиката природного происхождения примерно в 2,5 раза меньше, чем у серийных и в 2,0 раза меньше, чем хромированных.

Цикловая подача серийных плунжерных пар (рис. 3) по окончании испытаний снизилась в 2,65 раза, восстановленных хромированием — в 2,25 раза, в то время как восстановленных с применением композиционного покрытия — на 31,1% (композиция 90% серпентинита + 10% силиката, модифицированного полисахаридом природного происхождения) и на 35,5% (композиция 90% серпентинита + 10% силиката природного происхождения).

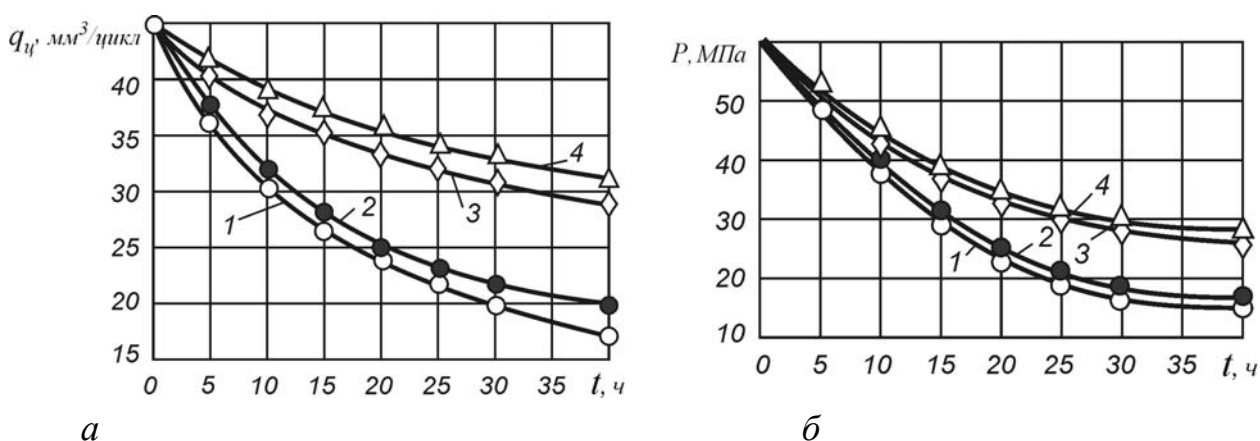


Рис. 3. Зависимости цикловой подачи топлива (а) и давления топлива, развиваемого ТНВД (б) дизеля Ч 10,5/13 от длительности ускоренных стендовых испытаний для плунжерных пар:

- 1 – новой пары; 2 – пары с покрытием плунжера гальваническим хромом;
- 3 – пары с покрытием плунжера хромом, упрочненным серпентинитом, модифицированным полисахаридом природного происхождения;
- 4 – пары с покрытием плунжера хромом, упрочненным композицией 90% серпентинита + 10% силиката, модифицированного полисахаридом природного происхождения

По окончании испытаний гидроплотность серийных плунжерных пар составила 6 с, восстановленных хромированием — 11 с, восстановленных с применением композиционного покрытия — 20 и 23 с (гидроплотность всех плунжерных пар до испытаний была 44–46 с).

Давление топлива, создаваемое ТНВД серийными парами, по окончании испытаний составило 15 МПа, хромированных – 18 МПа, с композиционными покрытиями – 26–29 МПа.

Партия опытных плунжерных пар с композиционными покрытиями в количестве 5 штук была установлена в ТНВД СОД Akasaka DM30R т/х «Bella» в марте 2008 г. По состоянию на 30.12.2011 г. пары отработали 15,2 тыс. ч. и продолжают эксплуатироваться в виду удовлетворительного состояния.

Годовой экономический эффект при восстановлении 300 плунжерных пар СОД и 50 плунжерных пар МОД составляет 2 602 600 рублей за счет увеличения срока службы восстановленных плунжерных пар по сравнению с новыми более чем в 1,5 раза при цене восстановленных деталей в пределах 40 % цены новой пары.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В диссертационной работе, на основании выполненных исследований, получены следующие основные научные результаты и выводы, определяющие научную новизну и практическую значимость работы.

1. Установлены особенности изнашивания плунжерных пар ТНВД дизелей, работающих на тяжелых сортах топлива: наибольший износ плунжера и втулки наблюдается в верхней части, при этом величина износа плунжера больше износа втулки в 3,2–5,5 (в среднем в 4,2) раза.

2. Установлено, что существующие технологии восстановления не обеспечивают требуемую долговечность плунжерных пар ТНВД, так как при их проектировании не учитывается комплексно технологические особенности методов нанесения покрытий и упрочнения, а также условия эксплуатации деталей.

3. Определены критериальные параметры композиционного покрытия плунжера, диаметального зазора и гидравлической плотности плунжерных пар ТНВД, обеспечивающие заданную долговечность. Получены зависимости гидроплотности плунжерных пар от диаметального зазора в паре и длины золотниковой части плунжера. Контроль качества восстановленных плунжерных пар целесообразно осуществлять по их гидроплотности, т.к. по результатам испытаний на основании полученных зависимостей можно оценить величину диаметального зазора и наличие местных износов. Критериальное значение гидроплотности для плунжерных пар ТНВД, обеспечивающее заданную долговечность, составляет не менее 15 с. Для обеспечения вероятности безотказной работы  $P(t) = 0,9$  для плунжерных пар МОД в течение 20 тыс. ч, а СОД 14 тыс. ч скорость изнашивания поверхностей трения пары следует уменьшить соответственно в 1,7 и 2,1 раза.

4. Решена задача обеспечения заданной долговечности плунжерных пар ТНВД нанесением композиционных износостойких покрытий с учетом комплекса «технология – плунжерная пара – эксплуатация» на основе системного проектирования. Для этого разработана методика функционирования системы формирования параметров материала в этом комплексе. Процесс формирования базируется на рациональном сочетании химических, механических, триботехнических свойств и структуры материала поверхностного слоя плунжера, адаптированных к конкретным условиям эксплуатации и получаемых в результате выбора оптимальных материалов, метода и параметров режима нанесения композиционного покрытия.

5. Получены математические зависимости износостойкости сопряжения «сталь ХВГ – гальванический хром» и микротвердости хрома от параметров режима хромирования, а также зависимость величины износа хромового покрытия от его микротвердости в условиях трения при наличии абразива в топливе. Определена оптимальная область параметров режима хромирования.

6. Разработаны композиции материалов, обладающие наиболее высокой износостойкостью, минимальным коэффициентом трения и оптимальной топографией покрытий для восстановления плунжеров. Наиболее перспективными являются: 90% серпентинита + 10% силиката, модифицированного полисахаридом; 90% серпентинита + 10% силиката; серпентинит, модифицированный полисахаридом.

7. Получены зависимости величин скоростей изнашивания композиционного покрытия и сопряженной стали ХВГ от параметров режима упрочнения хромового покрытия. Наибольшее влияние на скорости изнашивания покрытия и сопряженной стали ХВГ оказывает усилие прижатия индентора к упрочняемой поверхности, причем с увеличением усилия прижатия скорость изнашивания уменьшается.

8. Установлено, что модифицирование поверхности хрома минеральными и органоминеральными материалами позволяет повысить износостойкость сопряжения «сталь ХВГ – композиционное покрытие» в диапазоне температур подогрева топлива 20–100 °С, снизить величины износа, коэффициентов трения и температуры в зоне трибоконтакта. Причем по мере увеличения температуры подогрева топлива эффект от модифицирования хрома возрастает. Наиболее высокими триботехническими свойствами обладает композиционное покрытие — хром, упрочненный композицией 90% серпентинита + 10% силиката, модифицированного полисахаридом.

9. Установлено, что динамическая микротвердость и модуль упругости поверхностного слоя покрытия оказывают существенное влияние на коэффициент трения и износостойкость трибоузла. Увеличение динамической микротвердости твердости композиционного покрытия до 1098–1067 НВ и снижение модуля упругости до  $(1,82–2,11) \times 10^5$  Н/мм<sup>2</sup> покрытия обеспечивают максимальную износостойкость трибосопряжения.

10. Внедрены положения и результаты работы. Реализация разработанного технологического процесса восстановления плунжерных пар путем нанесе-

ния износостойкого композиционного покрытия на плунжер для судовладельцев дает существенный экономический эффект, так как срок службы восстановленных плунжерных пар по сравнению с новыми более чем в 1,5 раза больше, а цена восстановленных пар не превышает 40 % цены новой пары.

### **Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:**

#### *Рецензируемые научные издания*

1. Леонтьев, А.Л. Повышение надежности прецизионных деталей топливной аппаратуры судовых дизелей технологическими методами / Л.Б. Леонтьев, А.Л. Леонтьев // Судостроение №3, 2011, с. 40-41.
2. Леонтьев, А.Л. Формирование износостойких покрытий на прецизионных узлах трения / Л.Б. Леонтьев, Н.П. Шапкин, А.Л. Леонтьев // Металлообработка №3, 2011, с. 14–17.
3. Леонтьев, А.Л. Системное проектирование технологического процесса формирования износостойких покрытий / Л.Б. Леонтьев, А.Л. Леонтьев // Металлообработка № 1, 2012, с. 48–52.

#### *Патенты*

4. Приоритетная справка № 211151404 от 15.12.2011 г. Способ получения антифрикционной композиции / Л.Б. Леонтьев, Шапкин Н.П., А.Л. Леонтьев, А.Л. Шкуратов.
5. Приоритетная справка № 211151407 от 15.12.2011 г. Способ получения антифрикционной композиции / Л.Б. Леонтьев, Шапкин Н.П., А.Л. Леонтьев, А.Л. Шкуратов.

#### *В сборниках научных трудов высших учебных заведений и материалах международных конференций*

6. Леонтьев, А.Л. Применение геоминералов для повышения долговечности узлов трения: проблемы и перспективы использования / Л.Б. Леонтьев, А.Л. Леонтьев // Вестник МГУ, Сер. Судостроение и судоремонт. 2005. С. 82–88.
7. Леонтьев, А.Л. Внедрение новых технологий – путь повышения надежности и снижения затрат на ремонт оборудования / Л.Б. Леонтьев, А.Л. Леонтьев // Вестник МГУ, Сер. Судостроение и судоремонт, вып. 12. 2006. С. 3–11.
8. Леонтьев, А.Л. Повышение долговечности судовых дизелей нанесением износостойких покрытий на детали трибоузлов / Л.Б. Леонтьев, А.Л. Леонтьев, А.М. Макаренков // Проблемы транспорта Дальнего Востока. Пленарные доклады восьмой междунар. научно-практич. конф., Владивосток: ДВО Российской Академии транспорта, 2009. С. 93–94.
9. Леонтьев, А.Л. Причины отказов и дефекты плунжерных пар судовых дизелей / Л.Б. Леонтьев, А.Л. Леонтьев // Вестник МГУ, Сер. Судостроение и судоремонт, вып. 38. 2010. С. 3–11.

10. Леонтьев, А.Л. Технологическое обеспечение долговечности плунжерных пар дизелей путем применения композиционных покрытий / Леонтьев Л.Б., Шапкин Н.П., Леонтьев А.Л. // Вестник МГУ, Сер. Судостроение и судоремонт, вып. 47. 2011. С. 3–7.

11. Леонтьев, А.Л. Управление формированием эксплуатационных свойств при восстановлении прецизионных деталей топливной аппаратуры хромированием / Л.Б. Леонтьев, А.Л. Леонтьев // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня. В 2 ч. Ч. 2: Материалы 13-й Международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. С. 181–185.

12. Леонтьев, А.Л. Повышение долговечности прецизионных деталей топливной аппаратуры дизелей нанесением износостойких композиционных покрытий / Л.Б. Леонтьев, Шапкин Н.П., Леонтьев А.Л. // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня. В 2 ч. Ч. 2: Материалы 13-й Международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. С. 186–189.

13. Леонтьев, А.Л. Повышение триботехнических свойств сопряжения нанесением композиционных покрытий / Л.Б. Леонтьев, Н.П. Шапкин, А.Л. Леонтьев, А.Г. Токликишвили // Materiały VII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Perspektywiczne opracowania są nauką i technikami – 2011» Volume 55. Techniczne nauki.: Przemysł. Nauka i studia. Str. 31–34.

14. Леонтьев, А.Л. Восстановление прецизионных деталей топливной аппаратуры судовых дизелей нанесением износостойких композиционных покрытий / Л.Б. Леонтьев, А.Л. Леонтьев, А.Г. Токликишвили, А.Л. Шкуратов // Материалы международной научно-практической конференции «Современные материалы, техника и технология», Курск: Юго-Зап. гос. ун-т. 2011. С. 216–219.