

На правах рукописи

Добряков Дмитрий Викторович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ
АНТИИЗНОСНЫХ ПОКРЫТИЙ ФРИКЦИОННЫМ АЛИТИРОВАНИЕМ
НА ДЕТАЛИ АВТОТРАКТОРНОЙ ТЕХНИКИ**

Специальность: 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для
агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса» (ФГБНУ «Росинформагротех»)

Научный руководитель: **Балабанов Виктор Иванович,**
доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой сельскохозяйственного строительства
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева»

Официальные оппоненты: **Жачкин Сергей Юрьевич,**
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры эксплуатации транспортных и
технологических машин ФГБОУ ВО
«Воронежский ГАУ имени императора Петра I»

Бондарева Галина Ивановна,
доктор технических наук, доцент, главный
научный сотрудник, заместитель директора
ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Саратовский государственный университет
генетики, биотехнологии и инженерии
имени Н.И. Вавилова»

Защита состоится «17» декабря 2026 года в 15.00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.030.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел.: 8 (499) 976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н. И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» и на сайте Университета www.timacad.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Н. Н. Пуляев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Межремонтный ресурс большинства двигателей сельскохозяйственной техники после капитального ремонта составляет 30...47 % от ресурса новых. Например, автомобильные двигатели часто поступают на первый капитальный ремонт примерно через пять лет эксплуатации, тогда как двигатель за этот период проходит его уже два-три раза.

На двигатель внутреннего сгорания (ДВС) и его системы (смазывания, питания, охлаждения и выпуска) приходится 50...55 % от общего числа отказов автомобилей и до 50 % отказов тракторов и комбайнов. В тоже время, в результате исследований, например, по тракторным двигателям установлено, что на детали кривошипно-шатунного механизма приходится примерно половина всех отказов.

Характерными отказами являются: падение давления масла из-за износа подшипников коленчатого вала, наличие продольных рисок на шейках коленчатого вала и вкладышах и некоторые другие.

Восстановление изношенных шеек коленчатых валов может быть обеспечено с помощью различных технологий: шлифованием под ремонтный размер, наплавкой покрытий, электроконтактной приваркой металлического слоя или полувтулок, напылением порошкового материала, нанесением электрохимических покрытий и рядом других технологических методов. Однако в большинстве случаев износостойкость восстановленных поверхностей остается недостаточной.

На основании вышеизложенного исследования по направлениям повышения износостойкости и долговечности восстановленных коленчатых валов, является современной и актуальной задачей, не только для агропромышленного комплекса, но и для других отраслей экономики Российской Федерации, эксплуатирующих автотракторную технику.

Диссертационная работа подготовлена в соответствии с Федеральной научно-технической программой развития сельского хозяйства России на 2019-2025 годы (Подпрограмма «Развитие производства сельскохозяйственной техники и оборудования»), а также планами НИР ФГБНУ «Росинформагротех» в период 2021-2026 годов.

Степень разработанности темы исследования. Анализ научных работ Апатенко А.С., Ачкасова К.А., Батищева А.Н., Бледных В.В., Голубева И.Г., Казанцева С.П., Леонова О.А., Лялякина В.П., Поляченко А.В., Потапова Г.К., Тельнова Н.Ф., Северного А.Э., Сковородина В.Я., Черноиванова В.И., Юдина В.М. и др., позволил выявить основные виды отказов коленчатого вала автотракторных двигателей, причины возникновения и применяемые технологии их восстановления, а также рассмотреть состояние современных ремонтных производств. Установлено, что одним из недорогих и высокоэффективных методов повышения их триботехнических свойств является нанесение на трущиеся поверхности защитных покрытий методом финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО) различными разновидностями технологии.

Цель научных исследований. Разработка технологического процесса нанесения антиизносных покрытий фрикционным алитированием на шейки

коленчатых валов автотракторной техники.

Для выполнения цели работы в диссертации были поставлены и решены следующие **основные задачи**:

1. Теоретически обосновать необходимое контурное давление для нанесения антиизносного покрытия методом фрикционного алитирования;
2. Разработать новую технологическую жидкость (среду) для фрикционно-химического нанесения композиционных антифрикционных покрытий;
3. Разработать новый технологический процесс «Финишной антифрикционной безабразивной обработки шеек коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания» методом фрикционного алитирования;
4. Провести лабораторные триботехнические и физико-химические исследования разработанной технологии;
5. Осуществить апробацию, внедрение и дать экономическую оценку результатов работы.

Объект исследований. Финишная антифрикционная безабразивная обработка шеек (ФАБО) коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания автотракторной техники.

Предмет исследований. Триботехнические и физико-химические характеристики соединений трущихся соединений с нанесенными антифрикционными покрытиями.

Научная гипотеза. Повышение износостойкости шеек коленчатых валов автотракторных двигателей нанесением антиизносных противозадирых покрытий методом фрикционного алитирования.

Научная новизна диссертационных исследований заключается в:

- в теоретическом обосновании возможности и эффективности применения алюминия для фрикционного нанесения антиизносных покрытий;
- теоретически выведенной и экспериментально подтвержденной зависимости для определения необходимого давления при нанесении антифрикционных композиционных покрытий методом фрикционного алитирования;
- разработке новой технологической жидкости для фрикционно-химического нанесения покрытий на шейки коленчатого вала (Патент на изобретение RU № 2821971).

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в разработке, исследовании, апробации и внедрении технологического процесса фрикционного алитирования шеек коленчатых валов автотракторной техники, позволяющего исключить задиры обработанных поверхностей и повысить их износостойкость.

Методология и методы исследований. В работе применен комплексный метод исследований, включающий в себя теоретический анализ и обобщение результатов предшествующих научно-практических работ, включая теоретический расчет технологического процесса ФАБО шеек коленчатого вала, проведение сравнительных лабораторных исследований на триботехническом комплексе Timken machine по отработке технологии нанесения, технологических сред и оценке износостойкости обработанных поверхностей, физико-химические исследования нанесенных покрытий с использованием современных приборов с

автоматической регистрацией данных и применением ЭВМ. Обработка и графическое представление опытных данных проводилась с использованием современных вычислительных аппаратных средств и прикладных программ.

Положения диссертации, выносимые на защиту:

- теоретические исследования с экспериментальной проверкой режимов нанесения на шейки коленчатых валов композиционных антифрикционных покрытий по разработанной технологии;
- методика проведения триботехнических экспериментальных исследований;
- разработанная технология нанесения композиционных антифрикционных покрытий на шейки коленчатых валов фрикционным алитированием;
- результаты лабораторных триботехнических и физико-химических исследований;
- внедрение разработанной технологии и оценка эффективности результатов работы.

Степень достоверности и апробация результатов научных положений и исследований подтверждается теоретическими законами и положениями надежности машин и трибологии, применением современных методических приемов и измерительных приборов, допустимыми значениями ошибок математических операций и подтверждена использованием в реальных условиях эксплуатации. Основные положения диссертационной работы доложены и одобрены: на научно-технических заседаниях ФГБНУ «Росинформагротех» и кафедры сельскохозяйственного строительства РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева (2021-2026 гг.); Международной научно-практической конференции (МНПК) «Развитие научно-инновационного потенциала аграрного производства» (Тверь, 2022 г.); Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых посвященной 100-летию со дня рождения ветерана Великой Отечественной Войны, заслуженного деятеля науки и техники, заслуженного изобретателя РФ, д.техн.н., профессора Н.Ф.Тельнова. (Москва, 2023 г.); XV МНПК «Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК» (п. Правдинский, 2024 г.); Международной конференции «Современные проблемы энергоэффективности агроинженерных исследований в условиях цифровой трансформации» (Балашиха, 2025 г.); МНПК «Новые технологии при использовании техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве» (Тамбов, 2025 г.).

Реализация результатов исследования. Результаты исследований могут быть использованы на машиностроительных и ремонтных предприятиях при изготовлении и ремонте двигателей автотракторной, сельскохозяйственной и другой техники. Технологические решения внедрены в ООО «АгроУспех» при ремонте автомобильной техники, а также в учебный процесс РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева при изучении дисциплин «Основы триботехники», «Технология ремонта мелиоративных машин» и выполнении ВКР студентами различных профилей подготовки по направлению «Гидромелиорация».

Публикации результатов исследований. По результатам исследований опубликовано 15 научных работ, в том числе шесть статей в изданиях из

перечня, рекомендованного ВАК РФ, одна коллективная монография, патент на изобретение № 2821971 и база данных № 2025626041. Общий объем публикаций составляет 8,76 п.л., из них 7,08 п.л. принадлежит автору.

Личный вклад автора. Автором проведен литературно-патентный анализ способов восстановления коленчатых валов ДВС автотракторной техники, определены цель и задачи, сформулирован объект и предмет научных исследования, теоретическими методами рассчитаны оптимальные режимы фрикционного алитирования шеек коленчатого вала, разработана программа и методики испытаний, экспериментально исследованы получаемые фрикционные покрытия, разработан технологический процесс ФАБО шеек коленчатого вала, проведена апробация и рассчитан экономический эффект от внедрения результатов диссертации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, библиографического списка и приложений. Работа изложена на 135 страницах машинописного текста и содержит 42 рисунка, 16 таблиц, библиографию из 134 наименований и 10 страниц приложений.

Содержание работы

Введение содержит общую характеристику работы, обоснование актуальности темы и основные положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе **«Состояние вопроса, цель и задачи исследования»** дан анализ поставленной проблемы, выполнен обзор существующих технологий и научных работ по восстановлению и повышению износостойкости коленчатых валов, сформулированы цель и задачи исследования.

Анализ литературных источников, технологий ремонта и данных эксплуатации автотракторной техники позволил установить, что наиболее прогрессивными технологиями восстановления шеек коленчатых валов являются плазменное и газопламенное напыления, а самым дешевым и распространенным способом – шлифование под ремонтный размер. В то же время недостаточная износостойкость восстановленных коренных и шатунных шеек приводит к снижению межремонтного ресурса двигателя в целом в 1,5...2 раза.

Установлено, что повышение износостойкости восстановленных поверхностей трения может быть обеспечено за счет фрикционно-химического (трением в присутствии технологической среды) нанесения антиизносных, антифрикционных покрытий (База данных № 2025626041).

Во второй главе **«Теоретические аспекты и разработка технологий нанесения фрикционных покрытий»**, на основании анализа основных положений трибологии предложена теоретическая зависимость для определения давления натирающих инструментов – главного из режимов нанесения фрикционных покрытий.

Теоретическим анализом процесса нанесения фрикционных покрытий методом ФАБО, установлено, что повышение износостойкости нанесенных покрытий обеспечивается за счет активизации четырех факторов (каналов) нанесения: химического, механического, вакансионно-дислокационного и термического. Это потребовало разработки новой технологической жидкости (среды), оптимизации режимов нанесения и применения более эффективного

материала (алюминия) для натирающих инструментов.

В диссертационных работах д.т.н. В.И. Балабанова и к.т.н. В.В. Челюбеева предложено выражение для определения контурных давлений, при которых может быть реализовано внешнее трение (образование фрикционного покрытия):

$$P_c \leq (0,125 \sigma_T / \delta^2) (1 - 6\tau_n / \sigma_T)^2, \quad (1)$$

где P_c – контурное давление, обеспечивающее нанесение антифрикционного покрытия, МПа; σ_T – физический предел текучести, МПа; δ – комплексный параметр, характеризующий шероховатость обрабатываемой поверхности ($0 < \delta < 1$), мм; τ_n – касательные напряжения в зоне контакта натирающего инструмента и обрабатываемой поверхности ($\tau_n = 0,3 \sigma_\epsilon$), МПа.

Однако следует учесть, что ряд пластичных материалов, в том числе медные и алюминиевые сплавы, не имеют фактической площадки предела текучести. Поэтому предложено использовать параметр предела прочности при растяжении (σ_b) как имеющего реальные значения для применяемых материалов натирающих инструментов и более полно характеризующего напряженное состояние зоны контакта.

Таким образом, выражение (1) можно представить в виде:

$$P_c \leq (0,125 \sigma_\epsilon / \delta^2) (1 - 6\tau_n / \sigma_\epsilon)^2. \quad (2)$$

Для нанесения фрикционно-механического нанесения антиизносных покрытий из алюминиевых сплавов на шейки коленчатого вала разработана новая технологическая жидкость, включающая в себя соли меди, никеля и олова, глюкозу, глицерин и воду, которая дополнительно содержит соли алюминия (Патент на изобретение RU № 2821971).

Процесс нанесения покрытий осуществляется за счет использования явления переноса и (или) восстановления металла при трении в присутствии технологической среды, содержащей соли металла покрытий.

В качестве материала натирающего инструмента используются латунь Л 63 ($\sigma_{\epsilon 1} = 360$ МПа) и алюминиевый сплав АД-31 ($\sigma_{\epsilon 2} = 200$ МПа), для простоты расчетов предлагается использовать их среднее значение, определяемое по формуле:

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{1}{2} (\sigma_{\epsilon 1} + \sigma_{\epsilon 2}). \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{1}{2} (360 + 200) = 280. \quad (4)$$

В этом случае расчетная формула (2.4) примет следующий вид

$$P_p \leq K_i \cdot (0,125 \sigma_{\text{ср}} / \delta^2) \cdot (1 - 6\tau_n / \sigma_{\text{ср}})^2, \quad (5)$$

где $K_i = \frac{1}{n}$ – коэффициент, усредненного давления на каждом (i) из двух ($n = 2$) натирающих инструментов.

Проведем проверочный расчет теоретически выведенной зависимости для определения необходимого контурного давления для нанесения качественных композиционных антифрикционных покрытий трением к конкретным условиям

обработки.

Теоретический расчет необходимого давления в зоне трения по предложенной формуле (4) позволяет установить его значение:

$$P_p = \frac{1}{2} (0,125 \cdot 280 / 0,8^2) \cdot (1 - 504 / 280)^2 = 17,5 \text{ МПа.} \quad (6)$$

Следует учесть, что применяемые в работе конструкционные материалы покрытия (натирающих инструментов) могут испытывать различную степень деформации, а также пределы прочности материала подложки могут также существенно отклоняться от указанных значений. Все это требует соответствующей корректировки режимов обработки непосредственно в процессе нанесения композиционных антифрикционных покрытий на шейки коленчатого вала, в зависимости от качества обработки, которое может контролироваться посредством сравнения с эталонным образцом.

Производственная отработка режимов нанесения композиционных антифрикционных покрытий с использованием специального устройства (рис. 1), (имеющего возможность регулирования давления натирающего инструмента) для ФАБО деталей типа «вал» позволила подтвердить результаты представленных теоретических расчетов в части необходимого давления прижатия натирающего инструмента в зоне нанесения покрытия ($P_p = 17,5$ МПа), которое согласуется с имеющимися литературными данными $P = 10 \dots 20$ МПа.



Рисунок 1 – Устройство для отработки технологии фрикционного алитирования

В дальнейшем все покрытия наносили при следующих режимах: скорость нанесения 0,25 м/с, необходимое давление устанавливалось равное теоретически рассчитанному $P = 17 - 18$ МПа, минимальное количество рабочих ходов $i = 4$.

Для дальнейшего повышения износостойкости и задиростойкости получаемых покрытий необходима разработка мероприятий по изменению других составляющих технологии нанесения: применяемых материалов, устройств и режимов (активации механического, вакансионно-дислокационного и термических каналов).

Для осуществления обработки предлагаемым способом шеек коленчатого вала требуется удерживающее и вращающее устройство, например, токарно-винторезный станок модели 1К62 или суперфинишный модели 3875 КН.

На токарно-винторезный станок устанавливается коленчатый вал, на одну или несколько шеек коленчатого вала – одно или несколько приспособлений для фрикционно-механического нанесения покрытий (рис. 1). При этом натирающие инструменты изготовлены из прутка алюминиевого сплава АД-31 ГОСТ 4782-97. Поверхность обрабатываемой шейки коленчатого вала, смачивается разработанным содержащим алюминий составом для нанесения покрытий трением (Патент на изобретение RU № 2821971).

Натирающие элементы устройства вводят в соприкосновение с обрабатываемой поверхностью, прижимают с определенным усилием и включают вращающее устройство. Резкий свистящий звук указывает на протекание процесса нанесения покрытия (табл.1).

Таблица 1. Рекомендуемые режимы фрикционного алитирования

Материал		Режим обработки				
Детали	Натирающего инструмента	V , м/с	S , мм/об	F , МПа	i , проходов	Среда
Сталь	Алюминий АД-31 ГОСТ 4782-97	0,1 – 0,3	0,2	16 – 18	3 – 4	Патент RU № 2821971

V – линейная скорость продольной подачи натирающего инструмента, м/с; S – частота вращения обрабатываемой детали типа «вал», мм/об; F – давление прижатия натирающего инструмента к обрабатываемой поверхности, МПа; i – число рабочих ходов.

Обработка производится до получения равномерного покрытия без пропусков и крупных частиц перенесенного металла.

Восстановление и осаждение содержащихся в составе солей металлов позволяет получить более равномерное покрытие с высокими антифрикционными и антиизносными свойствами.

Обработанные поверхности моются 5 %-ным раствором глицерина в воде и сушатся. После чего привод станка выключается, коленвал снимается со станка.

Предлагаемый способ обработки обеспечивает: выглаживание обработанной поверхности шеек коленчатого вала с уменьшением их шероховатости; упрочнение подповерхностного слоя за счет наклепа; образование в результате диффузии пластичной антиизносной композиционной структуры поверхности; защиту от проникновения во внутренние структуры металла свободного водорода (защита от водородного изнашивания); наличие на обработанных поверхностях слоя твердосмазочного антифрикционного композиционного покрытия, что благоприятно воздействует на вкладыши коленчатого вала, вследствие частичного переноса на них с обработанных шеек пластичного покрытия при их эксплуатации.

Производственная отработка режимов нанесения композиционных антифрикционных покрытий с использованием специального устройства (рис. 1.), (имеющего возможность регулирования давления натирающего инструмента) для ФАБО деталей типа «вал» позволила подтвердить результаты данных теоретических расчетов также и в части необходимого контурного давления в зоне нанесения покрытия ($P_c = 6,5$ МПа), которое согласуется с имеющимися литературными данными $P = 5...10$ МПа. В дальнейшем все покрытия наносили

при следующих режимах: скорость нанесения 0,25 м/с, необходимое давление устанавливалось равное теоретически рассчитанному $P_c = 6,5$ МПа, количество рабочих ходов $i = 4$.

Коэффициент сходимости (K_{cx}) теоретических и практических данных определялся по формуле

$$K_{cx} = R_{\text{теоретические}} / R_{\text{опытные}} \quad (7)$$

где R – значения, показатели, величины.

Приближенный расчет коэффициента степени деформации контактирующих материалов (оптимальных условий образования качественных антифрикционных покрытий), с учетом применения двух различных конструкционных материалов по разработанной технологии нанесения композиционных антифрикционных покрытий на шейки коленчатого вала ($\sigma_m = 250$ МПа), подтверждает выдвинутые нами теоретические предположения:

$$K_{cx} = (280 / 250) = 1,12. \quad (8)$$

Исследование разработанной технологии нанесения композиционных антифрикционных покрытий трением и анализ литературных источников позволил разработать критерии ориентировочной оценки качества натирания коленчатых валов на этапе обработки (табл. 2).

Таблица 2 – Критерии оценки качества покрытия шеек коленчатых валов

Критерий оценки	Цвет покрытия	Истирание материала	Пропуски покрытия	Шероховатость покрытия
Отлично	Красновато-желтый	Нет (0,0...0,2 мкм)	Нет	Ниже исходной
Хорошо	Красноватое	Малое (0,3...0,5 мкм)	Немного	На уровне исходной
Удовлетворительно	С матовыми просветами	Среднее (0,6...0,9 мкм)	Умеренно	На уровне исходной
Плохо	Очень просветленный	Большое (более 1 мкм)	Очень много	Выше исходной
Брак	Покрытия нет	Деформирование стержня	Покрытия нет	Много выше

В третьей главе «*Методика экспериментальных исследований*» проведено планирование исследовательских работ, представленное на рисунке 2, описаны соответствующие методики проведения экспериментальных исследований.

В работе применен комплексный метод исследований, включающий лабораторные исследования на триботехническом комплексе Timken machine по отработке технологии нанесения, технологических сред, физико-химические исследования поверхностей трения и проб смазочных материалов, сравнительные стендовые и эксплуатационные испытания двигателей с восстановленными коленчатыми валами.

Выбор и испытания технологической жидкости проводились на основе результатов литературно-патентного анализа (База данных № 2025626041). Определялись тенденции в создании технологических жидкостей путем выявления влияния различных компонентов на процесс нанесения и получаемые свойства пластичных покрытий. Сравнительные испытания разработанных и

базовых технологических сред проводились в режиме приработки.

Исследования элементного состава образцов методом Резерфордского обратного рассеяния (РОР) проводилось на установке ЭГ-5 (Объединённого института ядерных исследований, ОИЯИ, г. Дубна). Измерения проводились на пучке ионов гелия с энергией 2 МэВ при угле наклона мишени $\alpha = 60^\circ$ и 30° и угле рассеяния альфа-частиц $\theta = 170^\circ$. Обработка энергетических спектров и получение профиля концентраций элементов по глубине пленок в исследуемых образцах проводилась с применением программы моделирования SIMNRA. Сплошными красными линиями на полученных графиках (рис. 5) показаны результаты моделирования экспериментальных данных при помощи программы SIMNRA, которые позволяют провести оценку концентрации различных элементов послойно по всей толщине образца.

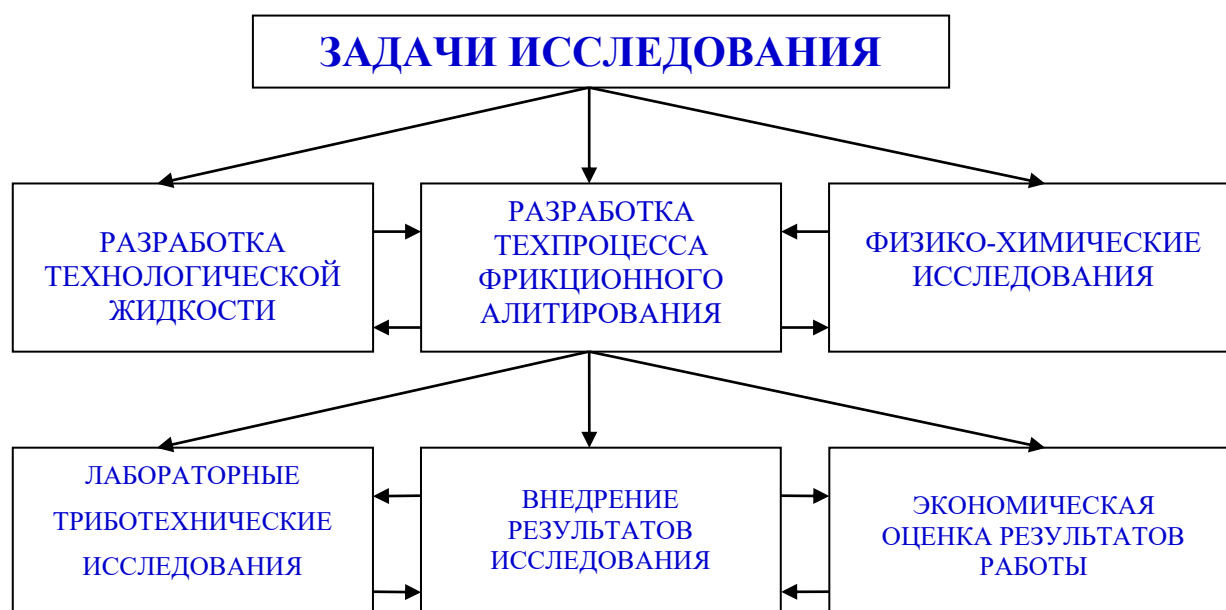


Рисунок 2 – Планирование исследовательских работ

Также проводилось фотографирование и изучение поверхностей трения после сравнительных триботехнических испытаний указанной технологии.

Четвертая глава *«Результаты экспериментальных исследований»* посвящена анализу проведенных испытаний.

Сравнительные лабораторные испытания новой разработанной технологической жидкости выявили возможность повышения износостойкости обработанных образцов не более чем на 5 % по сравнению с последними разработками в этой области (например, составами марки СФП и аналогичными), что потребовало проведения дополнительных исследований, так как дальнейшее улучшение качества антифрикционных покрытий за счет оптимизации технологических сред (активации химического канала нанесения) оказалось практически исчерпано.

Нанесение композиционных антиизносных покрытий по разработанной технологии фрикционного алитирования обеспечивает снижение интенсивности изнашивания обработанных поверхностей по сравнению с известными технологиями нанесения покрытий в среднем на 8,2 % (рис. 3) при снижении момента трения на 9,4 %.

Физико-химические исследования конструкционной стали 45 ГОСТ 1050–2013 с начальной твердостью НВ 280 ($H_{\mu} = 2800$ МПа) после нанесения композиционных антифрикционных покрытий по разработанной технологии позволили установить, что на обработанных поверхностях образуется наклеп до НВ 375 ($H_{\mu} = 3750$ МПа). При этом зона наклепа поверхностных слоев образцов с покрытием наблюдается на глубине $d = 15...35$ мкм, чем обеспечивается положительный градиент механических свойств основы (рис. 4).

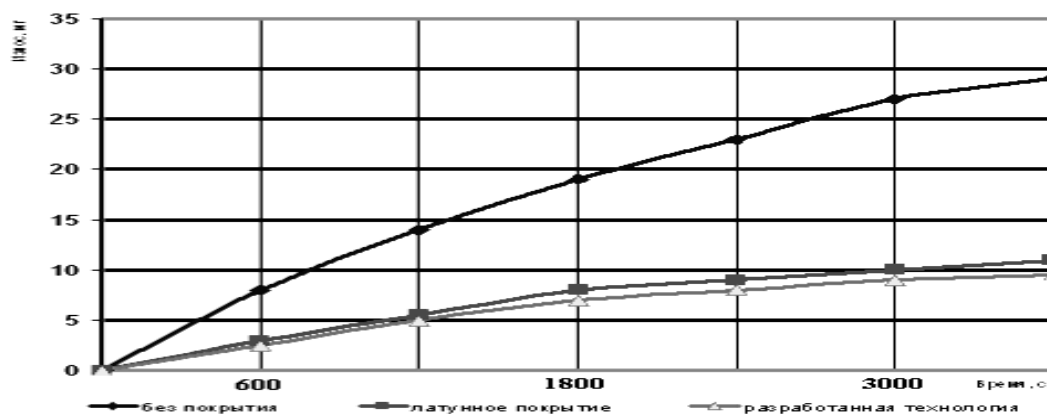


Рисунок 3 – Износ образцов при применении разработанной технологии

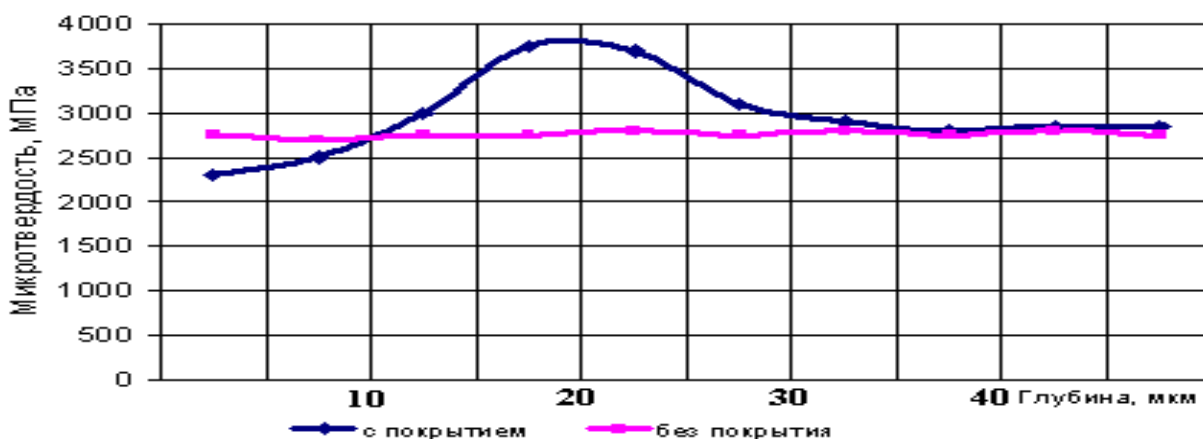


Рисунок 4 – Микротвердость (H_{μ} , МПа) стальных образцов

На основании проведенных физико-химических исследований по изучению особенностей формирования и распределения химических элементов в антифрикционных покрытиях на основе *Cu-Al* получены следующие основные результаты (рис. 5-6).

Анализ химического состава покрытия позволил установить, что при толщине внешнего слоя, не превышающей всего 404 нм, в базовой железной основе до глубины 4036 нм наблюдается наличие диффузионной переходной зоны, состоящей из химических элементов технологической среды и натирающих инструментов (меди и алюминия), чем в том числе обеспечиваются высокие антифрикционные свойства обработанных поверхностей.

Алюминий равномерно распределен по всей глубине образцов (~13 ат.%), что подтверждает его роль как легирующего элемента, обеспечивающего стабильность и повышенную износостойкость структуры.

Медь показывает минимальную концентрацию (~17 ат.%) в поверхностном слое, увеличиваясь до максимума (~79 ат.%) на глубине около 1 мкм. Это может быть связано с миграцией меди вглубь структуры или селективным окислением поверхности.

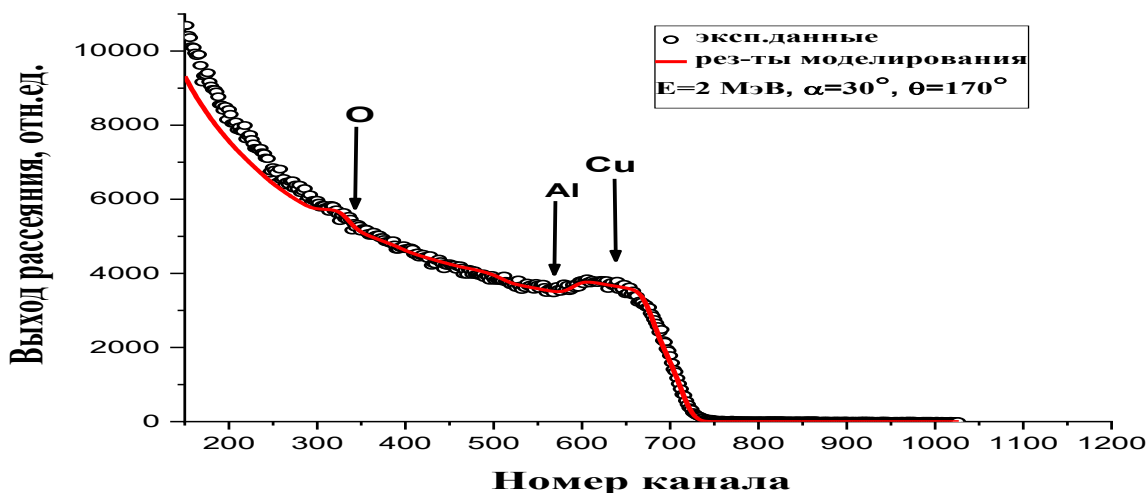


Рисунок 5 – Энергетический спектр RBS

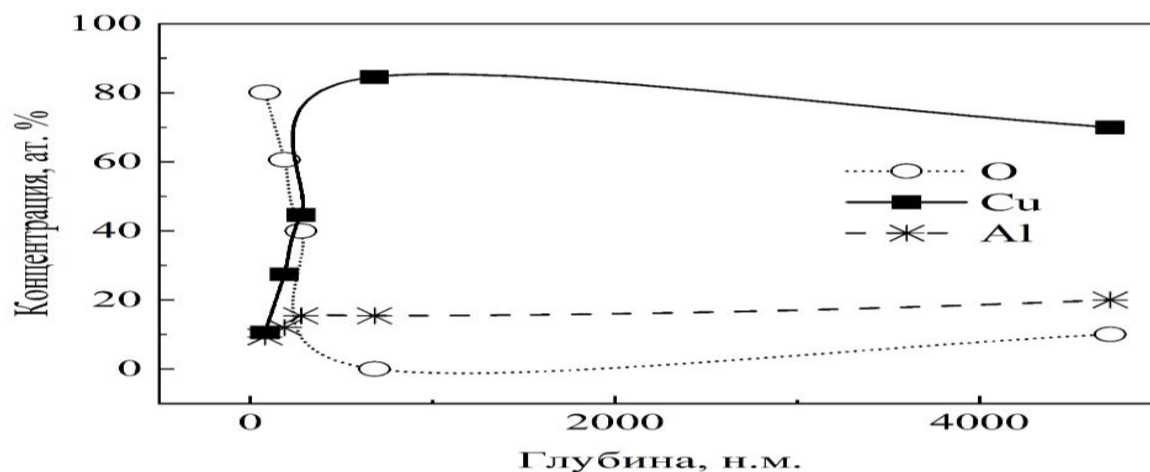


Рисунок 6 – Распределение химических элементов по глубине образца

Кислород доминирует в поверхностных слоях (~72 ат.%), что указывает на интенсивное окисление материала. На глубине более 4 мкм содержание кислорода снижается до фоновых значений (<1 ат.%), подтверждая локализацию окислительных процессов в приповерхностной области. Полученные данные по содержанию кислорода в поверхностных слоях, указывают на необходимость консервации нанесенных покрытий для их сохранения при внедрении технологического процесса фрикционного алитирования.

Нанесение антифрикционных покрытий трением позволяет перенести разрушительные процессы схватывания и последующего разрушения поверхностей трения с резким повышением интенсивности изнашивания в зону пластичной легко деформируемой пленки нанесенного покрытия и переходной зоны без протекания усталостных процессов и накопления дефектов поверхности (роста количества дислокаций). Наиболее эффективно применение антифрикционных покрытий из композиционных материалов с различными усилиями сдвига, пластичностью, пределами текучести и прочности.

В пятой главе *«Внедрение и экономическая оценка результатов исследований»* приводятся результаты производственной апробации и оценка экономической эффективности результатов работы.

Опытное внедрение разработанной технологии восстановления коленчатых валов осуществлено в ООО «АгроУспех» (г. Ростов-на-Дону). На основании производственной апробации технологии в условиях ремонтно-механических мастерских и результатов лабораторных испытаний разработан технологический процесс «Финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО) шатунных и коленных шеек коленчатого вала двигателей внутреннего сгорания» (2025–РФ–049297) для его внедрения на ремонтно-технических предприятиях.

Структурная схема разработанного технологического процесса ФАБО деталей типа «вал» методом фрикционного алитирования представлена на рис. 7.



Рисунок 7 – Схема технологического процесса фрикционного алитирования детали типа «вал»

Технические решения, представленные в диссертации, используются при чтении лекций и проведении практических занятий в РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева по дисциплинам «Эксплуатация и ремонт мелиоративных машин» и «Основы триботехники», а также при выполнении ВКР студентами направления 35.03.11 Гидромелиорация, направленности – Техника и технология гидромелиоративных работ.

Экономический эффект от внедрения разработанной технологии в ООО «АгроУспех» за расчетный период 6 лет (2021-2026 гг.) составит 107,6 тыс. р. (в ценах на 01.09.2026 г.) при сроке окупаемости затрат 32 рабочих дня.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании анализа литературно-теоретических данных нанесения антифрикционных покрытий методом ФАБО, установлено, что повышение износостойкости обработанных поверхностей может быть обеспечено посредством активизации четырех факторов (каналов): химического (База данных № 2025626041), механического, вакансионно-дислокационного и термического, что обеспечивается разработкой новых технологических сред, применения композиционных покрытий и оптимизацией режимов их нанесения.

2. В диссертации разработан новый способ повышения износостойкости поверхностей трения (активации механического, вакансионно-дислокационного и термических каналов) методом фрикционного нанесения алюминийсодержащих антифрикционных покрытий. На основании теоретических исследований предложена математическая зависимость (формула 5) для определения необходимого контурного давления для нанесения алюминиевых антифрикционных покрытий методом ФАБО.

3. Для активации химического канала нанесения в диссертации разработана содержащая алюминий технологическая жидкость (Патент на изобретение RU № 2821971). Сравнительные лабораторные триботехнические испытания среды выявили возможность повышения износостойкости обработанных образцов около 5 % по сравнению с последними разработками в этой области, что потребовало проведения дальнейших исследований в данной области.

4. Разработанный метод нанесения композиционных покрытий, содержащих алюминий, обеспечивает снижение интенсивности изнашивания обработанных поверхностей по сравнению с известными технологиями нанесения покрытий трением на шейки коленчатого вала в среднем на 8,2 % при снижении момента трения на 9,4 %.

5. Физико-химические исследования конструкционной стали 45 ГОСТ 1050–2013 с начальной твердостью HB 280 ($H_{\mu} = 2800$ МПа) после нанесения композиционных антифрикционных покрытий по разработанной технологии позволили установить, что на обработанных поверхностях образуется наклеп до HB 375 ($H_{\mu} = 3750$ МПа). При этом зона наклепа поверхностных слоев образцов с покрытием наблюдается на глубине $d = 15...35$ мкм, чем обеспечивается положительный градиент механических свойств основы.

6. Анализ химического состава покрытия позволил установить, что при толщине внешнего слоя, не превышающей всего 404 нм, в базовой железной основе до глубины 4036 нм наблюдается наличие диффузионной переходной зоны, состоящей из химических элементов технологической среды и натирающих инструментов (меди и алюминия), чем в том числе обеспечиваются высокие антифрикционные свойства обработанных поверхностей. При этом алюминий равномерно распределен по всей глубине образцов (~13 ат.%), что подтверждает его роль как легирующего элемента, обеспечивающего стабильность и повышенную износостойкость структуры. Медь показывает минимальную концентрацию (~17 ат.%) в поверхностном слое, увеличиваясь до максимума (~79 ат.%) на глубине около 1 мкм.

7. Установлено, что кислород доминирует в поверхностных слоях (~72 ат.%), что указывает на интенсивное окисление материала. На глубине более 4 мкм содержание кислорода снижается до фоновых значений (< 1 ат.%), подтверждая локализацию окислительных процессов в приповерхностной области. Полученные данные по содержанию кислорода в поверхностных слоях, указывают на необходимость консервации нанесенных покрытий для их сохранения при внедрении технологического процесса фрикционного алитирования.

8. Для реализации предложенного способа автором разработан, испытан и внедрен технологический процесс «Финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО) шатунных и коленных шеек коленчатого вала двигателей внутреннего сгорания» (11-РФ-049297) с применением изготовленной опытной партии технологической жидкости, позволяющий полностью исключить задир обработанных поверхностей трения и повысить их износостойкость более чем в три раза. Экономический эффект от внедрения разработанной технологии в ООО «АгроУспех» за расчетный период 6 лет (2021-2026 гг.) составит 107,6 тыс. р. (в ценах на 01.09.2026 г.) при сроке окупаемости затрат 32 рабочих дня.

Рекомендации производству.

Для дальнейшего повышения работоспособности коленчатых валов автотракторных двигателей на ремонтных предприятиях рекомендуется применять ФАБО коренных и шатунных шеек на основе разработанной технологии фрикционного алитирования, с последующим применением в эксплуатации металлоплакирующих алюминийсодержащих присадок к смазочным материалам.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшее исследование и совершенствование технологического процесса фрикционного алитирования может быть рекомендовано для машиностроительных предприятий при изготовлении двигателей автотракторной, сельскохозяйственной и другой техники.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи в научных журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. Балабанов В.И., **Добряков Д.В.** Анализ технологий восстановления коленчатых валов автотракторной техники //Агроинженерия, 2024. Т.26. № 5. С. 31-38.
2. Балабанов В.И., Голубев И.Г., **Добряков Д.В.** Совершенствование технологического процесса фрикционного нанесения защитных покрытий // Техника и оборудование для села. 2023. № 10 (316). С. 31-34.
3. Balabanov V.I., **Dobryakov D.V.**, Alipichev A.Yu. Developing the technology of friction alitising // Agricultural Engineering (Moscow), 2023; 25 (5): С. 52-56.
4. Балабанов В.И., Ивахненко Н.Н., **Добряков Д.В.** Теоретические основы несения фрикционных покрытий. Агроинженерия, 2025. Т.26. № 5. С.61-67.
5. Балабанов В.И., Ивахненко Н.Н., **Добряков Д.В.**, Дорошкевич А.С., Кругляк А.И. Исследование структуры покрытий, полученных методом фрикционного алитирования // Техника и оборудование для села. 2026. № 1. С. 34-37.
6. Структура и состав медно-алюминиевых фрикционных покрытий при трении / В.И. Балабанов, Н.Н. Ивахненко, В.Г. Борулько, **Д.В. Добряков**, А.И. Кругляк, М.Ю. Бадекин // Агроинженерия, 2026. Т.28. № 3. С.74-83.

Статья в международном научном журнале из системы Scopus

7. Balabanov V.I., **Dobryakov D.V.** Analysis of physical and mechanical principles of crankshaft reconstruction // Technical Physics, 2025, Vol. 70, N. 1, pp. 19–23.

Результаты интеллектуальной деятельности

8. Балабанов В.И., **Добряков Д.В.** Технологический состав для фрикционно-механического нанесения покрытий натирающим инструментом. Патент на изобретение RU № 2821971 С1, 28.06.2024. Заявка № 2023122292 от 28.09.2023.
9. Балабанов В.И., Ивахненко Н.Н., **Добряков Д.В.**, Морозов А.В. Технологические составы для фрикционного нанесения покрытий. База данных № 2025626041, 2025.

Коллективная монография

10. Усманов Н.К., Худаев И.Ж., Балабанов В.И., **Добряков Д.В.** Диагностирование дизельных двигателей мелиоративных и строительных машин / Монография, Саратов, Амирит – 2024 г. - 80 с. ISBN: 978-5-00207-487-7.

Публикации в других изданиях

11. Балабанов В.И., **Добряков Д.В.** Нанесение антиизносных покрытий в ремонтном производстве фрикционными методами / В сборнике. Развитие научно-инновационного потенциала аграрного производства. Сборник научных трудов по материалам Междунар. науч.-практ. конф. Тверь, 2022. С. 320-322.

12. Балабанов В.И., **Добряков Д.В.** Триботехнические испытания фрикционных покрытий. В сборнике: Реинжиниринг и цифровая трансформация эксплуатации транспортно-технологических машин и робототехнических комплексов. Сборник статей Московской междунар. межвузовской науч.-практ. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. Москва, 2023. С. 113-116.

13. Балабанов В.И., **Добряков Д.В.** Метод повышения износостойкости восстановленных шеек коленчатого вала. / Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: матер. XVI Междунар. науч.-практ. Интернет-конф. «ИнформАгро-2024» – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2024.– С. 282-286.

14. **Добряков Д.В.** Разработка технологического состава для фрикционного алитирования // Сборник трудов науч.-практ. конф. «Современные проблемы энергоэффективности агроинженерных исследований в условиях цифровой трансформации», Балашиха, 2025. С. 7-33.

15. **Добряков Д.В.**, Мареева О.В. Разработка технологии нанесения антифрикционных покрытий / Сборник трудов Междунар. науч.-практ. конф. «Новые технологии при использовании техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве». Тамбов, 2025 г. С. 294-296.