

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«РОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ИНФОРМАЦИИ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО
ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ
АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА»
(ФГБНУ «РОСИНФОРМАГРОТЕХ»)

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 агропро-
мышленного комплекса

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Балабанов Виктор Иванович

Москва 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ.....	9
1.1. Условия работы коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания автотракторной техники	9
1.2. Технологии восстановления коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания автотракторной техники.....	13
1.3. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) деталей.....	24
1.4. Технологические среды для нанесения покрытий трением.....	35
1.5. Выводы по главе 1. Цель и задачи исследования.....	42
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ НАНЕСЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ТРЕНИЕМ.....	44
2.1. Теоретический расчет необходимого давления для нанесения антифрикционных покрытий на шейки коленчатого вала.....	44
2.2. Разработка технологических жидкостей для фрикционного нанесения покрытий.....	50
2.3. Разработка технологии нанесения композиционных антифрикционных покрытий на шейки коленчатого вала.....	57
2.4. Выводы по главе 2.....	62
3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	64
3.1. Планирование исследовательских работ.....	64
3.2. Оборудование и аппаратура для лабораторных исследований....	67
3.3. Проведение лабораторных триботехнических испытания.....	74
3.4. Проведение физико-химических исследований.....	78
3.5. Выводы по главе 3.....	82

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	83
4.1. Результаты лабораторных триботехнических испытаний.....	83
4.2. Результаты физико-химических исследований композиционных антифрикционных покрытий.....	87
4.3. Выводы по главе 4.....	93
5. ВНЕДРЕНИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	95
5.1. Разработка технологического процесса «ФАБО коренных и ша- тунных шеек коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания»...95	
5.2. Апробация и внедрение результатов исследования.....	97
5.3. Экономическая эффективность результатов работы	99
5.4. Выводы по главе 5.....	107
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	109
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	112
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	125
1. Комплект документов технологического процесса финишной анти- фрикционной безабразивной обработки (ФАБО) шатунных и коренных шеек ко- ленчатых валов.	
2. АКТ № 01-25 опытного внедрения технологического процесса финишной анти- фрикционной безабразивной обработки (фрикционного алитирования) шеек коленчатых ва- лов двигателей внутреннего сгорания (ООО «АгроУспех» г. Ростов-на-Дону).	
3. Справка об использовании результатов научно-исследовательской работы (внедре- ния) в учебном процессе (ФГБОУ ВПО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»).	
4. Патент на изобретение RU № 2821971 С1 от 28.06.2024. Заявка № 2023122292 от 28.09.2023. Балабанов В.И., Добряков Д.В. Технологический со- став для фрикционно-механического нанесения покрытий натирающим инстру- ментом.	
5. База данных № 2025626041. Балабанов В.И., Ивахненко Н.Н., Добряков Д.В., Морозов А.В. Технологические составы для фрикционного нанесения по- крытий.	

ВВЕДЕНИЕ

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 [6-8, 13,40-41].

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 [6-8, 13,40-41, 63, 73, 112].

Характерными отказами являются: падение давления масла из-за износа подшипников коленчатого вала, наличие продольных рисок на шейках коленчатого вала и вкладышах и некоторые другие [6-8, 13,40-41, 63, 73, 112].

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 [9, 13, 21-23, 29, 40-42, 69, 76, 96-100, 127].

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

исследований 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», 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 работах, в том числе шесть статей в изданиях из перечня, рекомендованного ВАК РФ, одна коллективная монографии, описание патента 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 и содержит 42 рисунка, 16 таблиц, библиографию из 134 наименований и 10 страниц приложений.

1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

1.1. Условия работы коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания автотракторной техники

Послеремонтный ресурс большинства ДВС после капитального ремонта составляет 30...47 % ресурса новых, реже он равен 60...80 %. Ресурс новых двигателей также не достигает норматива. Автомобиль КАМАЗ-740 поступает на первый капитальный ремонт примерно через пять лет, а его двигатель проходит ремонт за этот период уже два–три раза. Анализ эксплуатации автотракторной техники (АТТ) показал, что 34...45 % отказов приходится на двигатели [6-8, 13,40-41, 63, 73, 112].

Наиболее сложной и дорогостоящей деталью двигателя внутреннего сгорания является коленчатый вал. Во время эксплуатации коленчатые валы дизельных двигателей изнашиваются достаточно интенсивно в силу различных факторов. При ремонте ДВС коленчатые валы необходимо заменять новыми или производить восстановительный ремонт. В связи с тяжелым финансовым положением практически всех отечественных автотранспортных предприятий приобретение новых коленчатых валов, особенно импортных, из-за их непомерно высокой стоимости, становится невозможным. На первое место выходит восстановительный ремонт коленчатых валов [6-8, 13,40-41, 63, 73, 112].

Характерными отказами кривошипно-шатунного механизма ДВС являются: падение давления масла из-за износа подшипников коленчатого вала, наличия продольных рисок на шейках коленчатого вала и вкладышах, а также дефектов уплотнительных устройств [6-8, 13,40-41, 63, 73, 112].

Исследования, проведенные в г. Харькове [2, 8, 11], позволили установить, что вкладыши коленчатого вала одного из наиболее распространенного в сельском хозяйстве России и стан СНГ двигателя СМД–62 работают в неблагоприятных условиях, с точки зрения гидродинамики масляного слоя. Толщина масляного клина в зоне действия максимальных газовых сил на рабочих режимах

двигателя соизмерима с суммарной высотой микронеровностей поверхностей вкладышей и шеек коленчатого вала [2, 70]. Гребешки шероховатости поверхностей входят в соприкосновение друг с другом, в результате возрастает сила трения, повышается температура, и работа соединения переходит в режим граничного трения, когда смазочный слой между трущимися поверхностями уже не предохраняет их от соприкосновения [2, 81].

В условиях высоких нагрузок в соединении «шейка–вкладыш» двигателя СМД-62 в диапазоне 8...12 МПа и достигающих значения 40 МПа, а также при скоростях скольжения поверхностей трения, равных при пуске 6...10 м/с, отечественные антифрикционные сплавы, применяемые в тракторостроении, не удовлетворяют требованиям надежности [2, 42, 107].

Для коленчатых валов ДВС АТТ наиболее интенсивно протекает механическое изнашивание в следствие механического воздействий (пластического деформирования, абразивного и усталостного изнашивания) [26, 32-33, 45-48, 100].

Процесс абразивного изнашивания поверхностей трения коленчатого вала протекает при резании или царапании их высокотвердыми частицами, находящимися в свободном виде в смазочном материале или закрепленном состоянии в конструкционном материале вкладышей. В зависимости от вида среды (жидкость или газ), перемещающей твердые частицы, различают гидроабразивное и газоабразивное изнашивание. Абразивные частицы размером 1...30 мкм всегда присутствуют в воздухе, смазочном материале или трущихся поверхностях. Абразивными частицами могут служить продукты изнашивания, твердые частицы оксидов, частицы нагара [7-8, 13, 32-33, 55, 93, 105].

Коленчатые валы под действием знакопеременной нагрузки подвергаются усталостному изнашиванию и утрачивают в работе часть усталостной прочности. Критическим напряжением при усталости является предел выносливости. Этот показатель в отличие от других прочностных характеристик (пределов упругости, текучести и прочности) во многом зависит от состояния поверхности детали [2, 8, 26, 32-33, 45-48, 100].

Уровень напряженности коленчатого вала постоянно растет. Одной из

причин этого является изменение зазоров между валом и коренными вкладышами вследствие неравномерного износа, что ведет к несоосности коренных шеек и коренных опор блока, сопровождающимися дополнительным изгибом и снижением его запаса прочности [2, 8, 26, 32-33, 45-48, 100].

Коленчатые валы АТТ изготавливаются из конструкционных (стали 40-45) и легированных (18ХНВА) сталей, либо высокопрочного чугуна (марки ВЧ 50). Шейки коленчатых валов закаливаются токами высокой частоты (ТВЧ) до твердости 36...60 HRC на глубину 1,5...3,5 мм [8, 11, 13, 29, 65].

Основные дефекты и повреждения коленвалов – износ и деформации коренных и шатунных шеек, резьб, отверстий и торцев, усталостные трещины. Поэтому при их ремонте требуется восстановление расположения, формы, размеров и шероховатостей этих элементов, износостойкости и задиростойкости трущихся поверхностей и усталостной прочности. Точность механической обработки восстановленных шеек соответствует пятому-седьмому квалитетам, шероховатость трущихся поверхностей Ra 0,32...0,63 мкм, при точности углового расположения кривошипов $\pm 7,5^\circ$, и допуске на радиус $+0,05$ мм [8, 13, 29, 65].

Допускается обработка шеек под ремонтные размеры. Ремонтный интервал шеек, как правило, составляет 0,25 мм. Восстановление коленчатых валов под ремонтные размеры позволяет обеспечить оптимальную трудоемкость процесса. Однако, при этом износ коренных шеек увеличивается на 15...20 %, начиная с третьего ремонтного размера, а усталостная прочность снижается до 25 % при достижении последнего ремонтного размера [8, 11, 13, 29, 65].

Основные дефекты и методы восстановления коленчатых валов, например, двигателя автомобиля КамАЗ представлены в табл. 1.1.

Важнейший ресурс обеспечения высокого качества ремонта АТТ и другой СХТ, оптимального расходования материальных ресурсов – это разработка и внедрение современных технологий ремонта в целях обеспечения высокой надежности восстанавливаемых машин [11, 24, 29, 37, 53, 96–98, 118, 121-122].

Таблица 1.1. – Дефекты и методы восстановления коленчатого вала двигателя КамАЗ [13, 122].

№ п/п	Возможные дефекты	Способ установления дефекта и средства контроля	По рабо- чему чертежу	Допустимый без ремонта	Рекомендации по устранению дефекта
1	Обломы и трещины	Дефектоскоп			Браковать
	Изгиб вала	Стенд контроля прогиба	Биение средней коренной шейки не более 0,03 мм		Править при биении более 0,03 мм
2	Увеличение длины шатунных шеек	Калибр 67,5	67 ^{+0,12}	67,5	Браковать при увеличении длины более 67,5 мм
3	Износ шатунных шеек d _ш Уменьшение диаметров шеек меньше номинального	Скобы Скоба 79,98	80 ^{-0,013}	79,98	Шлифовать шатунные шейки под ремонтный размер
4	Износ коренных шеек d _к Уменьшение диаметров шеек меньше номинального	94,98	95 ^{-0,015}	94,98	Шлифовать коренные шейки под ремонтный размер
5	Износ шейки под средний противовес и шестерню привода масляного насоса	Скоба 125,07	125 ^{+0,1}		Шлифовать шейку под ремонтный размер
6	Вмятины и забоины на направляющем штифте Ослабление посадки направляющего штифта Износ отверстия под направляющий штифт	Осмотр Проверить посадку легкими ударами медного молотка Пробка 11,99	12	11,99	Заменить штифт То же Обработать под ремонтный размер
7	Износ шпоночного паза под противовес и шестерню привода масляного насоса	Калибр 6,00	6	6,0	Обработать под ремонтный размер 6,5
8	Нарушение взаимного углового расположения отно- сительно 1-й шатунной шейки: 2-й шатунной шейки 3-й шатунной шейки	Приспособление для про- верки углового распо- ложения шатунных шеек	90° + 10° 180° + 10°		Браковать при угловом расположении более +25°
9	Изменение радиуса кривошипа r	Приспособление для за- мера радиуса	60 ^{+0,05}		Браковать при радиусе меньше 60,2 мм
10	Риски, задиры или износ шейки под манжету	Скоба 104,7	105 ^{-0,1}	125,07 104,70	Шлифовать до устранения рисков и задилов
11	Износ шпоночного паза под задний противовес и рас- пределительную шестерню	Калибр 8,00	8 ^{-0,015}	8,00	Обработать под ремонтный размер 8,5 ^{-0,015}
12	Износ отверстия под подшипник первичного вала КП	Пробка 52,01	52 ^{+0,08}	52,01	Поставить втулку
13	Биение заднего торца коленчатого вала	Индикаторное приспо- собление			Шлифовать поверхность шейки до устранения биения
14	Риски и задиры на опорной поверхности шейки под задний противовес и распределительную шестерню	Калибр 36,55	36,2 ^{+0,05}	36,55	Обработать до выведения следов износа

1.2. Технологии восстановления коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания автотракторной техники

Повышение ресурса работы, увеличение срока службы коленчатых валов, а, следовательно, и АТТ в целом, может быть достигнуто с помощью различных технологий. К их числу могут быть отнесены: различные виды наплавки покрытий, электроконтактная приварка металлического слоя (порошков, ленты и т.д.), разнообразные способы напыления материала, электроискровая обработка в процессе восстановления деталей, пластическое деформирование материала, способы нанесения электрохимических покрытий, нанесение покрытий химическим способом и многие другие [11, 13, 66, 69, 122].

В наибольшей степени требованиям надежности удовлетворяют те способы, у которых числовые отношения твердости (HRC_v/HRC_n) и предела усталостной прочности (G_{-1v}/G_{-1n}) восстановленных (в) и новых (н) деталей равны или больше единицы [11, 13, 15, 124]. Как показываем анализ данных, приведенных в таблице 1.2, ни один из методов полностью не удовлетворяет этому требованию, при этом износостойкость восстановленных деталей в большинстве случаев ниже износостойкости новых коленчатых валов.

В тоже время, академиками В.И. Черноивановым (ГОСНИТИ) и Э.С. Каракозовым (ВНПО «Ремдеталь») установлено, что при разработке технологических процессов и оборудования для восстановления деталей необходимо учитывать основные условия формирования качественных покрытий: термические воздействия на деталь должны полностью или частично предотвращать фазовые или структурные превращения в основном металле; перемешивание материалов основы и покрытия должно быть минимальным; надо избегать реакций, способных изменить химический и фазовый состав покрытия по сравнению с исходным материалом; в зоне соединения не должны развиваться процессы релаксационного характера, способные изменить ее структуру и фазовый состав [11, 13, 122, 124].

Процесс наплавки под слоем флюса, фактически, представляет собой совершенствование ручной электродуговой наплавки электродами с толстостенными покрытиями. Она была предложена академиком Е.О. Патоном. Особенность электродуговой наплавки под слоем флюса состоит в том, что сварочная электрическая дуга горит под слоем сухого гранулированного флюса толщиной 10...40 мм с размерами зёрен 0,5...3,5 мм между изделием и голым электродом. В зону горения подается полнотелая или порошковая электродная проволока (лента) и флюс (рис. 1.1). К наплавляемой поверхности и электроду подают электрический ток обратной полярности [20, 90].

Таблица 1.2 – Оценка способов восстановления коленчатых валов [15]

№ п/п	Способы восстановления	HRC _в / HRC _н	G _{-1B} / G _{-1H}
1	Шлифование под ремонтный размер	0,9	0,9
2	Обточка с последующей постановкой полуштуков	1,0	0,6
3	Автоматическая электровибрационная наплавка	0,7	0,4
4	Наплавка в различных средах	0,9	0,6
5	Механизированная дуговая наплавка порошковой проволокой с внутренней защитой	0,7	0,4
6	Электрометаллизация	0,6	0,9
7	Электролитические покрытия	0,4	0,5
8	Наплавка плазменной дугой	0,9	0,9

Наплавка в среде защитного газа, разработанная в ЦНИИТмаше коллективом под руководством профессора К.В. Любовского, устраняет некоторые недостатки наплавки под слоем флюса (рис. 1.2). Сущность наплавки в среде защитных газов состоит в том, что в зону электрической дуги подают под давлением защитный газ, в результате чего столб дуги, а также сварочная ванна изолируются от кислорода и азота воздуха [13, 23, 25, 29, 127].

К недостаткам наплавки в среде защитных газов относятся: повышенное разбрызгивание металла (5...10 %) и потери защитного газа; ограниченное легирование наплавленного металла; снижение износостойкости и усталостной прочности на 10...20 %; открытое световое излучение дуги и требование защиты от

неё сварщика. Использование флюса и специальных защитных газов при дуговой наплавке характерно рядом технологических трудностей.

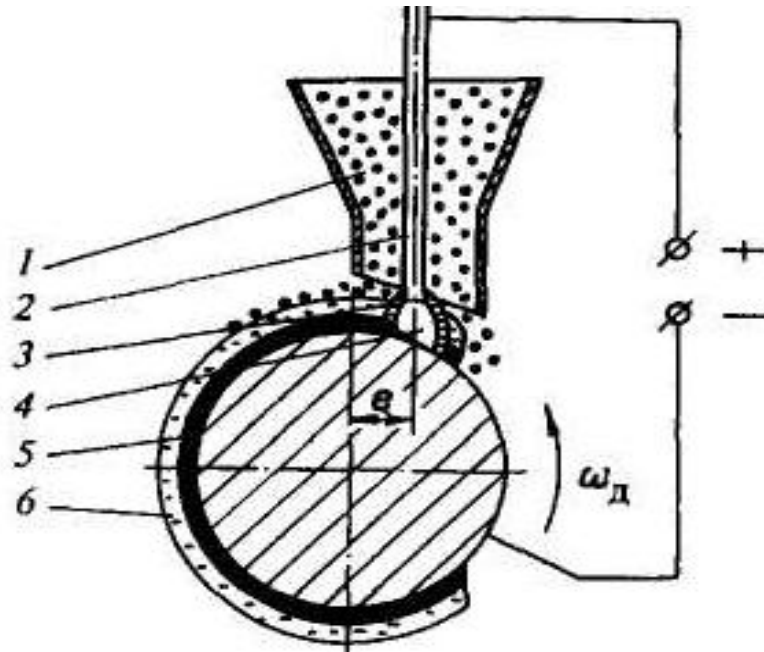


Рисунок 1.1 – Схема электродуговой наплавки под слоем флюса [13, 66, 122]:

- 1 – бункер с флюсом; 2 – сварочный электрод; 3 – расплавленный флюс;
4 – газопаровой пузырь; 5 – наплавленный слой; 6 – шлаковая корка;
 ϵ – смещение электрода с зенита; ω_d – угловая частота вращения детали

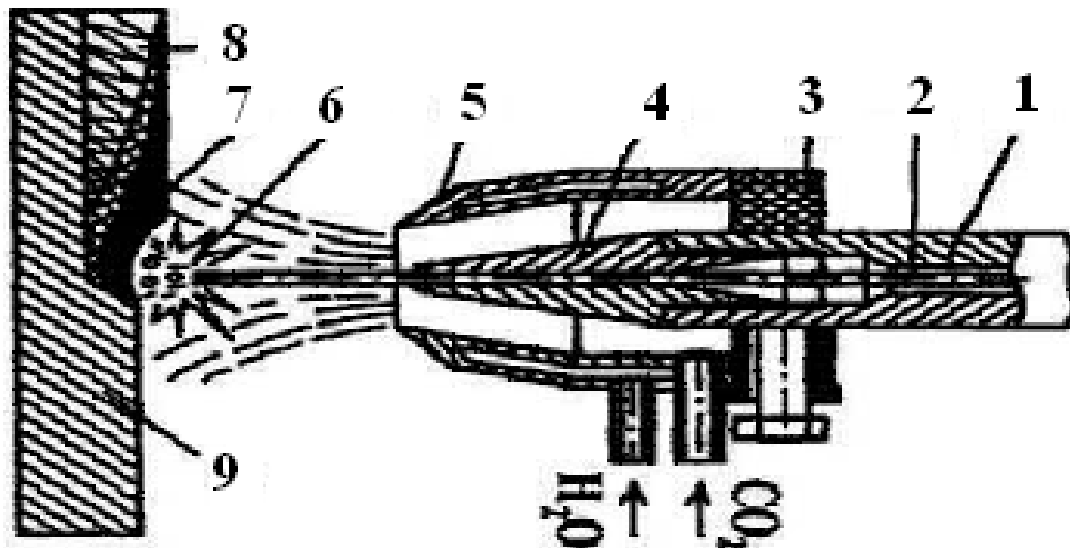


Рисунок 1.2 – Схема наплавки покрытия в среде защитного газа [13, 25, 122]:

- 1 – мундштук; 2 – электродная проволока; 3 – горелка; 4 – наконечник;
5 – сопло горелки; 6 – электрическая дуга; 7 – сварочная ванна; 8 – наплавленное покрытие; 9 – поверхность детали

Применение порошковой проволоки или ленты с требуемым химическим составом сердечника обеспечивает отказ от флюса и от защитных газов [13,122].

Процесс вибродуговой электрической наплавки (рис. 1.3) разработан инженером Г.П. Клековкиным в Челябинском институте механизации и электрификации сельского хозяйства (ЧИМЭСХ) в 1950...1952 гг [13, 25, 122].

Исходным материалом для нанесения покрытий из горячего металла принято использовать порошки (табл. 1.3). Это позволяет управлять процессом в широких пределах химическим и фазовым составом покрытия смешением в исходном состоянии различных порошков. Покрытия из них наносят как способами газотермического напыления и газопорошковой наплавкой, так и электроконтактной приваркой, индукционным напеканием и другими методами.

Таблица 1.3 – Химический состав и основные физико-механические свойства порошковых самофлюсующихся высокоуглеродистых сплавов [11]

Марка	Химический состав, %	Твердость, HRC	Температура плавления $T_{пл}$, °C	Структура покрытия
ПГ–CP2	0,4 C; 13,5 Cr; 4,5 Si; 1,8 B; Ni – остальное	40–45	1050	Карбиды, бориды в никелевой основе
ПГ–CP3	0,3 C; 15,0 Cr; 3,0 Si; 2,4 B; Ni – остальное	50–55	1050	
ПГ–CP4	0,8 C; 16,5 Cr; 3,7 Si; 3,3 B; Ni – остальное	58–62	990	
ПГ–C1	2,9 C; 29,0 Cr; 3,5 Si; 4,2 Mn; 4,0 Ni; Fe – остальное	51	1280– 1320	Карбиды хрома в железной основе
ПГ–C27	3,9 C; 26,0 Cr; 1,5 Si; 1,7 Ni; 0,3 W; 2,1 Mn; Fe – остальное	59	1280– 1320	
ПГ–UC25	4,9 C; 38,0 Cr; 2,1 Si; 2,5 Mn; 1,4 Ni; Fe – остальное	55	1290– 1320	

Плазменная наплавка – это процесс нанесения различных покрытий за счет применения плазменной струи, когда деталь включена в цепь тока нагрузки.

В этом случае с помощью плазменной струи нагреваются поверхность восстанавливаемой детали и наносимый материал. Материал перемещается плазменной струей, температура, которой может превышать 20 000 К. Плазменная наплавка (рис. 1.4) нашла применение при восстановлении ответственных деталей, к которым, например, относятся: коленчатые, кулачковые и распределительные валы, валы турбокомпрессоров, оси, крестовины карданных шарниров, направляющие оборудования, щеки и седла задвижек и др.

Область практического применения технологии – нанесение тонкослойных покрытий наплавкой на высоконагруженные детали с небольшими износами. Данный вид наплавки служит конкурентным процессом по сравнению с нанесением гальванических покрытий. При плазменной наплавке получают покрытия толщиной 0,2...6,5 мм и шириной 1,2...45 мм. Если наносится легкоплавкий материал, то возможно нанесение покрытия с проплавлением очень тонких поверхностных слоев без оплавления поверхности [13, 23, 59, 87, 106, 122].

В то же время, наплавка сопряжена с большим вложением тепла в материал детали, что приводит к выгоранию легирующих элементов, образованию структур закалки, возникновению микротрещин, сложностям с механической обработкой. С другой стороны, недостатки наплавки проявляются в случае восстановления деталей с малым износом.

Минимальная толщина наплавочных покрытий ограничена. Наплавка под слоем флюса обеспечивают толщину покрытия > 3 мм, а вибродуговая и в среде защитных газов > 2 мм. Таким образом, основная часть наплавленного металла превращается в стружку при механической обработке покрытия. Кроме того, большинство видов наплавки связано с тяжелыми и вредными условиями труда.

В связи с этим перспективно использование способов, обеспечивающих сохранение твердой фазы материала во время нанесения. К таким способам нанесения покрытий относятся электроконтактная приварка металлического слоя (рис.1.5) и различные виды газотермического напыления (рис.1.6) [13, 25, 122].

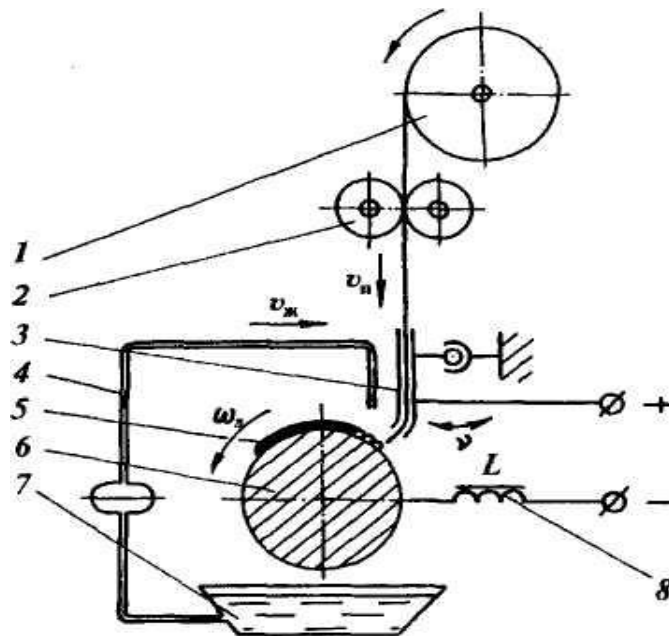


Рисунок 1.3 – Схема процесса вибродуговой наплавки покрытия:

1 – кассета с проволокой; 2 – подающие ролики; 3 – качающийся мундштук;

5 – наплавляемый слой; 6 – обрабатываемая деталь; 7 – емкость;

8 – индукционное сопротивление

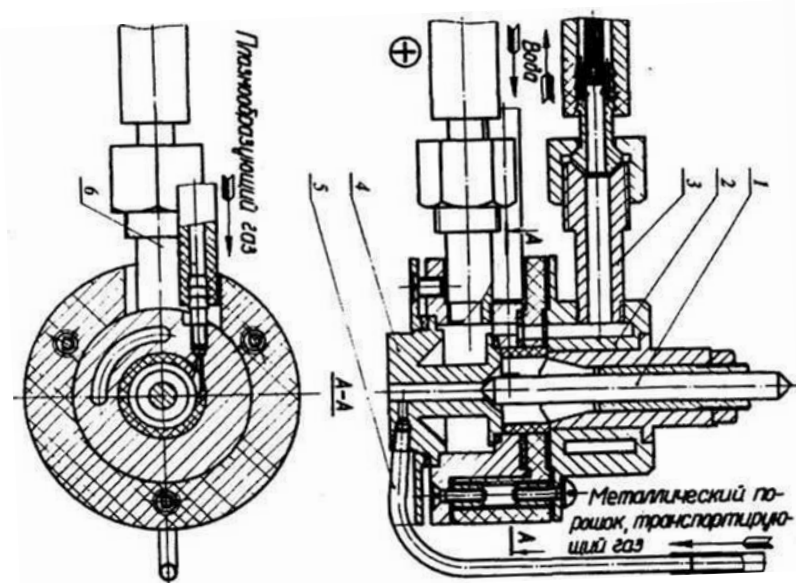


Рисунок 1.4 – Схема конструкции плазменной горелки:

1 – электрод-катод, 2 – стальной корпус; 3 – приспособление для подвода воды; 4 – водоохлаждаемое медное сопло-анод; 5 – приспособление для подвода порошка; 6 – приспособление для подвода газа

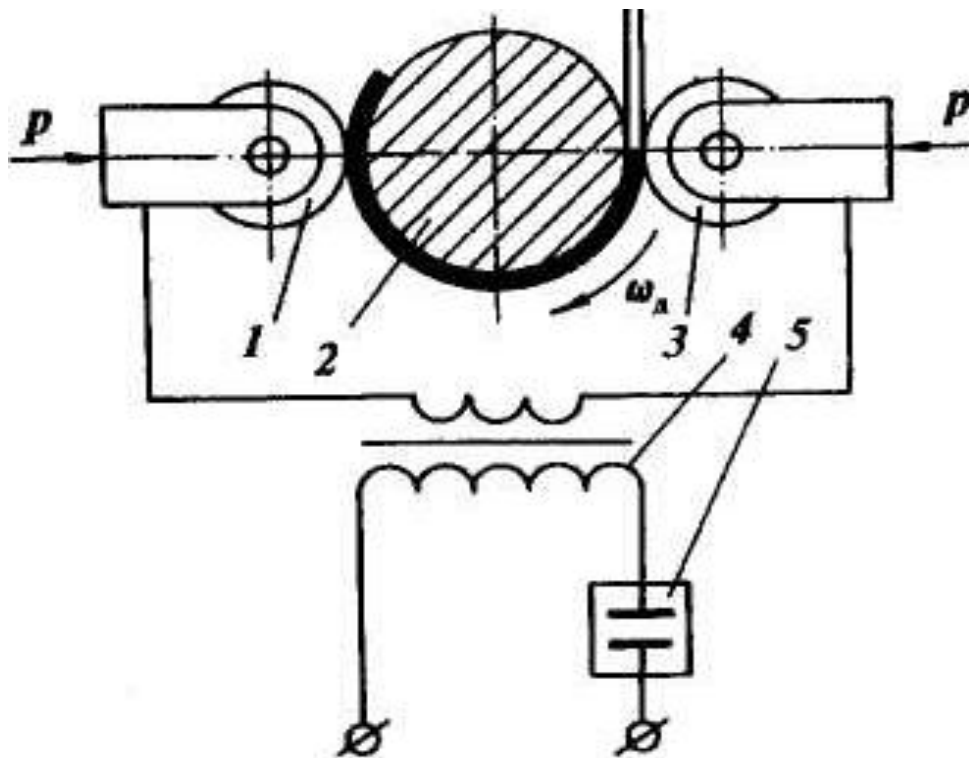


Рисунок 1.5 – Схема технологии электроконтактной приварки ленты [63, 66]:

1, 3 – ролики; 2 – обрабатываемая деталь; 4 – трансформатор; 5 – контактор

Технология заключается в электроконтактной приварки мощными импульсами тока металлического слоя на изношенной поверхности с приложением контактного давления. Технологический процесс электроконтактной приварки металлического слоя (ленты или полувтулок) разработан и широко внедрен под научным руководством д.техн.н., профессора А.В. Поляченко (ВНИИТУВИД «Ремдеталь»). Его коллективом также разработано и основное оборудование для его осуществления. Конструкционные материалы детали и наплавляемого слоя расплавляется в результате горения электрической дуги в точках непосредственного контакта материалов [13, 31, 63, 66, 122].

Источник тепловой энергии, используемый на нагрев и распыление наносимого материала, характеризует следующие основные виды нанесения покрытий (ГОСТ 28076–89): электродуговое, газопламенное, детонационное и плаз-

менное, делящееся дополнительно, на индукционное (рис.1.7) и плазменно-дуговое напыление. По принципу защиты рабочей зоны нанесения покрытий процессы подразделяют на методы без защиты, с защитой и процессы в герметичной камере. Характеристики различных видов напыления представлены в табл. 1.4 и рис. 1.10.

Таблица 1.4 – Характеристики различных способов напыления [13]

Параметр	Виды напыления			
	электродуговое	газопламенное	плазменное	детонационное
Производительность процесса, кг/г	3...50	1...10	3...12	0,1...6,0
Коэффициент использования напыляемого материала	0,80...0,95		0,70...0,90	0,30...0,60
Прочность соединения покрытия с основой, МПа	До 40	До 50	До 60	До 200
Температура частиц, °С	До 1800	До 3000		До 4000
Скорость частиц материала, м/с	50...150	20... 120	50...400	600... 800

Повышение скорости напыляемых частиц увеличивает запас их кинетической энергии. Эволюция скорости напыляемых частиц такова. Скорость частиц при тигельном напылении составляла 20...30 м/с (1940 г.), при электродуговом достигнута скорость 60 м/с (1950 г.).

В середине 50-х годов XX века было разработано детонационное напыление, которое обеспечило разгон частиц порошка до 800 м/с.

В 1960 г. достигнута скорость напыляемых частиц 170 м/с, в 1970 г. – 210 м/с (плазмотрон «Metco 7M»), в 1973 г. – 230 м/с (плазмотрон F4), в 1980 г. – 390 (плазмотрон ПН–21) и 610 м/с (сверхзвуковое плазменное напыление).

В 1998 г стало известно сверхзвуковое плазменно-канальное напыление (800 м/с).

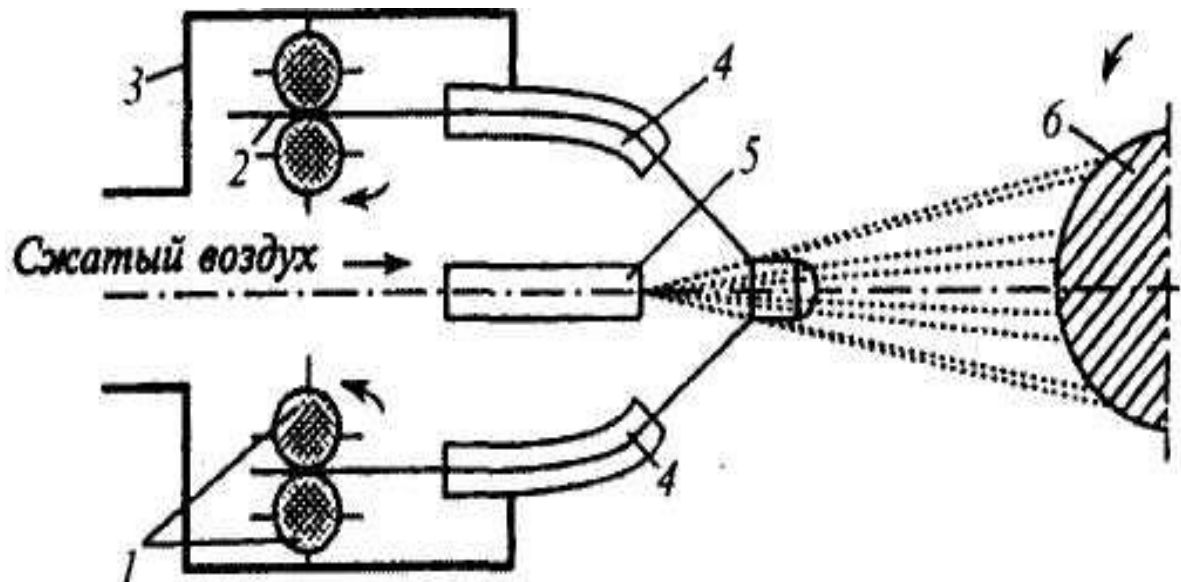


Рисунок 1.6 – Схема устройства для электродугового напыления [13, 120, 122]:

1 – подающие ролики; 2 – проволока; 3 – электрические провода; 4 – направляющие наконечника; 5 – сопло; 6 – восстанавливаемая деталь

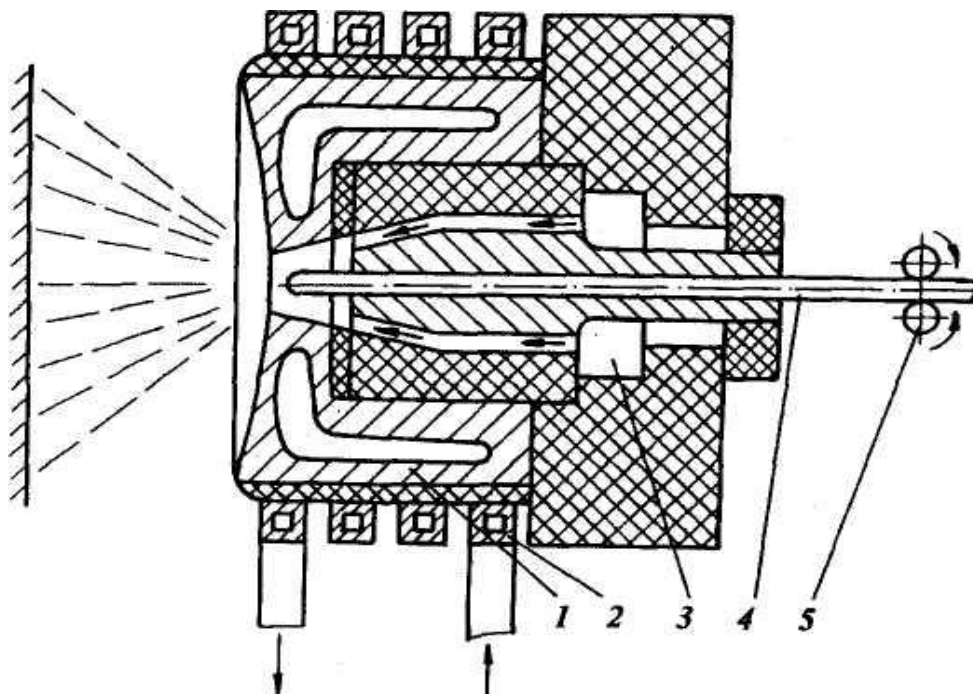


Рисунок 1.7 – Схема аппарата для индукционного напыления [11, 13, 122]:

1 – концентратор электрического тока; 2 – индуктор; 3 – воздушный канал;
4 – распыляемая проволока; 5 – подающие ролики

В 2000 г. внедрено многодуговое плазменное напыление со скоростью частиц 820 м/с (рис.1.11) [13, 25, 122].

Накопленная энергия затем расходуется на деформирование частиц и их закрепление, а малое время окисления способствует уменьшению толщины оксидных пленок, что в конечном итоге снижает пористость покрытий и резко повышает их физико-механические и эксплуатационные свойства [13, 25, 122].

Индукционное напыление разработано во ВНИИТВЧ им. В.В. Вологодина (г. Ленинград) и впервые применено в СССР.

Напыляемая проволока подается в индуктор, где нагревается и расплавляется вихревыми токами, возникающими за счет переменного магнитного поля. Расплавленный металл распыляется сжатым воздухом. Головка индукционного аппарата (рис. 1.7) имеет высокочастотный индуктор и концентратор тока, который обеспечивает нагрев проволоки на небольшом участке [11, 13].

Индукционное напыление обеспечивает небольшое окисление металла и высокую прочность покрытий, но имеет невысокую производительность процесса, а применяемое оборудование при этом сложное и дорогое.

Технологический процесс восстановления методом напыления материала в общем виде включает такие операции: предварительную обработку наносимого материала; предварительную механическую обработку восстанавливаемой поверхности; подготовку восстанавливаемой поверхности (нарезание «рваной» резьбы, дробеструйную обработку, обезжиривание); изоляцию поверхностей, не подлежащих напылению (установку заглушек в масляные каналы детали, выходящие в зону напыляемых поверхностей, установку экранов, нанесение лака); нагрев детали; нанесение подслоя; нанесение основного покрытия; оплавление покрытия; выдержку деталей в термосе; снятие экранов и заглушек, очистку детали [13, 120, 122].

Широкое внедрение напыления в ремонтном производстве сдерживается из-за высокой стоимости наносимых материалов и грубого искажения рекомендуемой технологии с субъективным подходом к оценке.

В тоже время, многолетний опыт применения напыления на передовых заводах СНГ, на предприятиях Австрии, Великобритании, Германии и Чехии показывает, что при учете специфических особенностей покрытий и соблюдении научных рекомендаций напыление становится рациональным способом создания ремонтных заготовок.

Необходимо учитывать, что напыленные покрытия работоспособны при минимальной толщине $\sim 0,3$ мм.

Способы напыления материала в порядке увеличения затрат располагаются в ряды: по удельным затратам на единицу массы покрытия: электродуговое – газопламенное – плазменное – детонационное; по удельным затратам на газ: электродуговое – газопламенное – плазменное – детонационное; по затратам на электроэнергию: газопламенное – детонационное – электродуговое – плазменное; по затратам на заработную плату с начислениями (трудоемкости): электродуговое – газопламенное – плазменное – детонационное.

В тоже время, анализ этих прогрессивных методов с позиций формирования тонкослойных износостойких покрытий из порошковых материалов показывает их еще значительное несовершенство: высокая удельная себестоимость, низкая производительность, отсутствие универсализации, неполная реализация физико-механических свойств порошковых материалов, низкая автоматизация и механизация процессов и другие недостатки, что требует их дальнейшего изучения и совершенствования [13, 120, 122].

Улучшение качества наносимых покрытий ведется в направлении повышения прочности сцепления и плотности, благодаря применению устройств для ускорения частиц порошка, установки высокоскоростного газопламенного напыления, использования новых технических решений, снижающих потери тепловой энергии пламени газопламенной установки, и повышающих качество смешивания горючего газа и окислителя, а также нагрева частиц порошка в пламени [13, 120, 122].

Как уже отмечалось, в настоящее время наиболее распространен метод, за-

ключающийся в шлифовании коленчатых валов под ремонтный размер, вследствие относительной простоты и низкой стоимости. Недостатком этого метода является удаление термообработанного поверхностного слоя обрабатываемых шеек, подрез краев галтелей, а также снижение усталостной прочности восстановленных коленчатых валов. При этом в стружку переводится не только конструкционный материал изделия, но и фактически уничтожается заложенный в коленчатый вал межремонтный ресурс [11, 13].

1.3. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) деталей

Проблема повышения ресурса и надежности двигателей охватывает вопросы их конструирования, технологии изготовления, ремонта и эксплуатации. Задача ближайшего будущего состоит в создании такого двигателя, который в течение всего периода эксплуатации не требовал бы капитального ремонта. Это вполне реально, надо лишь в 1,5 – 4 раза увеличить ресурс лимитирующих деталей, перечень которых невелик [9, 11, 82, 114, 121].

Важнейшее значение для получения высокой износостойкости трущихся поверхностей имеет вид их окончательной (финишной) абразивной обработки для снижения параметра их шероховатости (тонкое шлифование, плосковершинное хонингование, суперфиниширование, полирование и т. д.). Поэтому работы, направленные на повышение качества окончательной механической обработки трущихся деталей, имеют одно из первостепенных значений для повышения их износостойкости и ресурса [9, 11-13, 34-35, 50, 76, 96-98].

Применение антифрикционных, износостойких и твердосмазочных покрытий, наносимых на детали различными способами, позволит повысить износ- и коррозионную стойкость, сопротивление усталостному износу деталей и улучшению приработки трущихся деталей машин. Одним из направлений повышения ресурса новых и отремонтированных двигателей является применение финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО) [19, 95, 99].

В промышленности широко применяется метод фрикционного (с помощью трения) нанесения медьсодержащих покрытий – финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) [11-12, 27-28, 32-34, 74-78, 117, 123].

Сущность ФАБО заключается во фрикционном нанесении покрытий из пластичных металлов в присутствии специальной технологической среды на трущихся поверхностях деталей, таких как коренные и шатунные шейки коленчатого вала, гильзы цилиндров, реборды и поверхности качения колесных пар железнодорожного транспорта, различного вида штоки, пальцы, резьбовые соединения и ряд других [11-12, 27-28, 32-34, 74-78, 117, 123].

ФАБО применяется в целях снижения интенсивности изнашивания, повышения задиростойкости трущихся поверхностей и интенсификации процессов образования защитных пленок в период приработки после изготовления или ремонта изделий. Впервые данный метод нанесения покрытий (фрикционное латунирование) разработан Д.Н. Гаркуновым и В.Н. Лозовским [3, 32-35, 62].

Основные способы ФАБО условно делятся на две группы [11, 75]:

1. Нанесение металлических покрытий фрикционно–механическим способом инструментом из медьсодержащего сплава (фрикционное латунирование, бронзирование или меднение); фрикционно–химическим способом (ФАБО в металлоплакирующих средах, содержащих в своем составе различные поверхностно–активные вещества (ПАВ) и соли металлов, способных к восстановлению на обрабатываемых поверхностях при воздействии роликов, дисков, брусков, щеток, тампонов и т.д. из неметаллического инструмента); фрикционное нанесение покрытий из пластичных сплавов в металлоплакирующих средах.

2. Нанесение слоистых твердосмазочных покрытий в виде графита, дисульфида молибдена и других соединений контактным намазыванием различными методами.

К разновидностям ФАБО относятся: химико-механическое нанесение покрытий (Россия); нанесение покрытий трением с применением щетки (ФРГ); натирание поверхности латунью (Россия); электростатическое нанесение покры-

тий трением (Швейцария); механическое нанесение латунных поверхностей трением (механическое латунирование) в среде глицерина (ФРГ, Россия); химико-механическое латунирование с применением медьсодержащего вспомогательного материала FRT 1 (ФРГ) и ряд других [11, 32-35, 91, 129, 132-134].

Режимы нанесения покрытий методом ФАБО на стальные детали представлены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Режимы ФАБО стальных деталей [11-12, 27-28, 32-34, 74-78].

Материал		Режим обработки				
детали	покрытия	v , м/с	S , мм/об	P , МПа	i , рабочих хо- дов	технологиче- ская среда
сталь, чугун	медь,	0,15	0,2	80...100	3...4	глицерин
	латунь,	0,20	0,2	40...70		FRT 1
	бронза	0,20	0,2	60...80		СФП-2

Две нижние технологии объединяют упрочнение поверхностных областей с нанесением покрытий трением. Использование этих технологий имеет следующие преимущества: небольшие затраты расходных материалов и электроэнергии; стабильно высокое качество покрытия, в том числе и при некоторых отклонениях условий нанесения покрытий от оптимальных; возможность автоматизации процесса; экологическая безопасность; высокая экономическая эффективность и ряд других [[11-12, 27-28, 32-34, 74-78, 117, 123].

Принцип обоих этих способов латунирования состоит в том, что натирающий латунный элемент (стержень или трубка), вращаясь относительно своей продольной оси при относительно малом усилии нажатия и в присутствии вспомогательного рабочего материала (глицерина или материала FRT1), натирает на подлежащую покрытию стальную или чугунную поверхность слой латуни (рис. 1.8). В результате одновременно происходит упрочнение подповерхностной об-

ласти основного материала на глубину 70...80 мкм, вследствие высокого удельного давления в месте линейного контакта [91, 129, 132-134].

За рубежом наибольшее применение технологии ФАБО получили в бывшей ГДР. Работы в данном направлении велись под руководством д.т.н., профессора Г. Польцера в Высшей технической школе г. Цвикау [91, 129, 132-134].

Проведенные в Восточной Германии с 1978 г. фундаментальные и прикладные исследования установили, что при использовании высоколегированных масел достигаемый благодаря фрикционному латунированию эффект ниже, чем при использовании низколегированных масел. Это обусловило внедрение разработанной технологии в практику главным образом для условий использования низколегированных сталей [91, 129, 132-134].

На рисунке 1.9 представлена схема ФАБО инструментом с резиновым покрытием 3, который жестко закреплен на станке и приводится во вращение от электродвигателя с гибким приводом. Смазочная среда в жидком или полужидком состоянии подается от насоса через сопло 1 в зону между резиновым кольцом 2 и инструментом 3. Инструмент прижимается к поверхности вращающейся детали 4. В качестве смазочной жидкости используется смесь глицерина и олеата меди [4-5, 27]:

Сдерживающим фактором нанесения антифрикционных покрытий на шейки коленчатых валов являлось отсутствие надежных высоко эффективных приспособлений (устройств) для ФАБО. Литературно-патентный анализ позволил установить основные недостатки существующих устройств для нанесения антифрикционных покрытий на детали вращения типа «вал». К ним относятся: невозможность обработки галтелей коленчатых валов, необходимость частой переналадки и переустановки инструмента; невозможность обработки деталей с отверстиями на обрабатываемой поверхности и ряд других [8, 11].

Из известных конструкций для ФАБО шеек коленчатых валов наибольший интерес представляет конструкция, разработанная в Иркутском политехническом институте группой специалистов, под руководством С.И. Белозерцева и В.Н. Быстрова (рис. 1.10) [5].

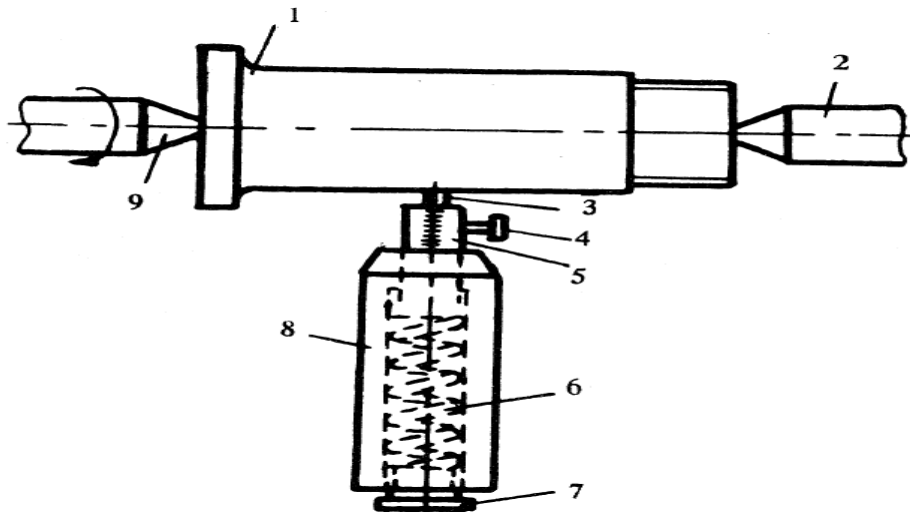


Рисунок 1.8 – Нанесение покрытий натиранием пластичных металлов [11]:

1 – деталь; 2 – подвижный центр задней бабки; 3 – латунный пруток; 4 – винт, закрепляющий латунный пруток; 5 – плунжер; 6 – спиральная пружина; 7 – резьбовая пробка; 8 – корпус; 9 – центр, закрепленный в патроне

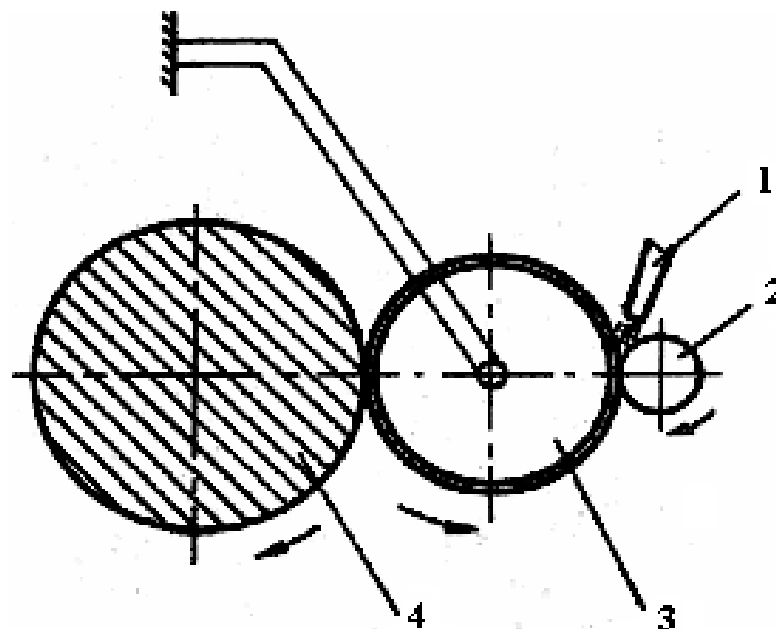


Рисунок 1.9 – Нанесение покрытий неметаллическим инструментом в металлоплакирующих средах [5]:

1 – сопло для подачи металлоплакирующей среды; 2 – прижимной ролик; 3 – ролик с резиновым покрытием; 4 – обрабатываемая деталь

Устройство содержит корпус, щеки, натирающие инструменты, регулировочный винт, гайку, пружину и тампон. Расположение натирающих инструментов под углом к оси обрабатываемой детали обеспечивает самостоятельное перемещение устройства относительно обрабатываемой поверхности. Большая площадь фактического контакта натирающих инструментов с поверхностью детали, необходимое суммарное усилие прижатия натирающих инструментов, лимитируемое только мощностью механизма вращения, задаваемая скорость вращения детали обеспечивают высокое качество получаемых покрытий [5, 8, 11].

В тоже время указанная конструкция имеет ряд недостатков: невозможность обработки галтелей коленчатых валов вследствие изнашивания и образования в процессе нанесения новой геометрии кромок натирающих инструментов, что препятствует осуществлению заданного прилегания их к поверхности галтели. При необходимости повторного прохода для увеличения толщины покрытия требуется переналадка устройства.

В Орловской аграрной академии под руководством д.техн.н., профессора В.Н. Хромова создано специальное устройство (рис. 1.11) для использования в ремонтном производстве при финишной (отделочной) обработке шеек коленвалов и нанесения противоизносных покрытий в процессе физико-химических реакций в присутствии рабочей среды на поверхности вала при его механической активации (трения) рабочим инструментом [13, 75, 119].

Разработанное устройство включает корпус с оправкой 1, на которой шарнирно закреплена вилкообразная державка 2 с пружиной 3. На концах державки 2 закреплены два корпуса головок 4 с вкладышами 5, в сферических канавках которых уложены шары 6. Шары 6 от выпадения удерживаются упорами 7, а также выступами, имеющимися на корпусах головок 4.

Упоры 7 к корпусам головок 4 крепятся болтами 8 с шайбами 9, а корпуса головок 4 к концам вилкообразной державки 2 – гайками 10 с шайбами 11. На краях вилкообразной державки 2 имеются регулировочные пазы. Оси металлических шаров 6 параллельны оси шейки обрабатываемого коленчатого вала 12, при этом шары одной головки установлены, таким образом, что они смещены

относительно друг друга, а торцы головок относительно крайних шаров [75, 119].

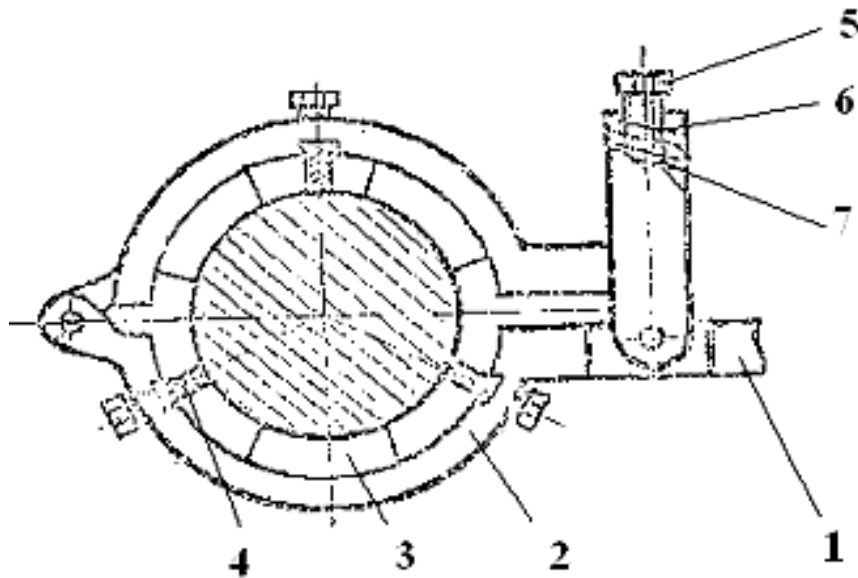


Рисунок 1.10 – Устройство для ФАБО валов [5]:

1 – корпус; 2 – щека; 3 – тампон; 4 – натирающий инструмент;
5 – регулировочный винт; 6 – гайка; 7 – пружина

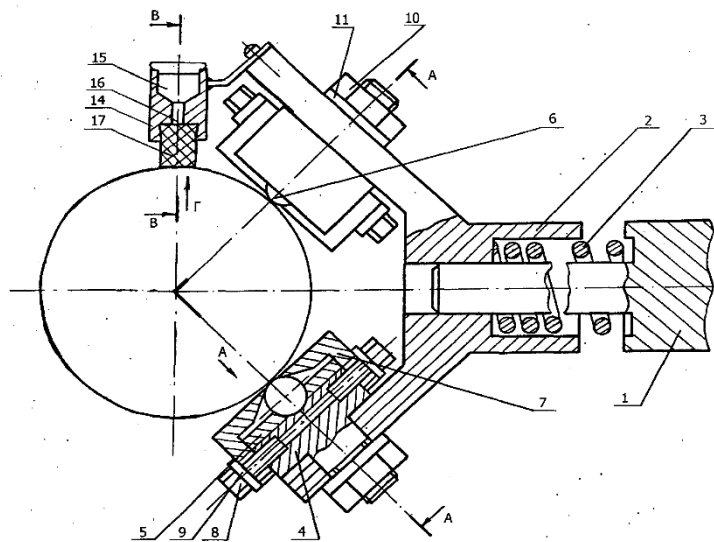


Рисунок 1.11 – Устройство для ФАБО валов [75, 119]:

1 – корпус с оправкой; 2 – вилкообразная державка; 3 – пружина; 4 – корпус головки с выступом; 5 – вкладыш со сферической канавкой; 6 – шар; 7 – упор;
8 – болт; 9 – шайба; 10 – гайка; 11 – шайба; 12 – деталь; 13 – упругая пластина;
14 – корпус натирающего инструмента; 15 – ванна для металлоплакирующей рабочей среды; 16 – отверстие; 17 – упругопористый элемент (тампон)

Автоматическая самоустановка шариковых натирающих головок 4 относительно шейки коленвала происходит за счет проворачивания вилкообразной державки 2 на цилиндрической поверхности оправки 1. Радиус шаров 6 подбирается таким образом, чтобы они были более радиуса галтели шейки коленвала. Установка головок 4 относительно шейки коленвала выполняется с помощью специальных прокладок, размещаемых между вилкообразной державкой 2 и головкой 4. Для перемещения шариковых головок имеются специальные поперечные пазы, а для технологичности изготовления и обеспечения долговечности устройства в шариковых головках могут быть установлены вкладыши 5 со особыми сферическими канавками. К концу вилкообразной державки 2 при помощи упругой пластины 13 закрепляется натирающий инструмент, изготовленной в форме корпуса 14 с ванной 15 прямоугольного вида для заправки металлоплакирующей технологической среды с находящимися на дне отверстиями 16, вместе с корпусом 14, в котором установлен тампон 17 [75, 119].

Данное приспособление для ФАБО шеек коленчатых валов функционирует следующим образом. Головки 4 с шарами 6 вводят в контакт с обрабатываемой поверхностью шейки коленчатого вала за счет пружины 3. При вращении коленвала головки с шарами 6 выполняют возвратно-поступательное перемещение по поверхности шейки. При этом, при движении головок с шарами 6 в одну сторону относительно галтели шейки коленвала крайний шар прижимается к верхней головки, при движении в другую сторону – прижимается шар противоположной головки. Это достигается за счет смещения шаров в ближних головках относительно краев корпусов 4 на определенную величину. Вследствие этого, проводится одновременное выглаживание галтели и цилиндрические поверхности шейки обрабатываемого коленчатого вала. Для нанесения на обрабатываемую поверхность коленчатого вала антифрикционного металлического покрытия в зону контакта из натирающего тампона 14 (например, войлока или губки) подается металлоплакирующая рабочая жидкость (среда) – 17 [75, 119].

При ФАБО шеек коленчатых валов можно использовать суперфинишные

головки с шарнирным креплением натирающих инструментов, конструкция которой представлена на рисунке 1.12. Предлагаемая технологическая оснастка может применяться для антифрикционной обработки шеек коленчатых валов на ремонтных предприятиях с использованием суперфинишных станков модели 3875 КН [75, 119].

Для ФАБО шеек коленчатых валов ДВС д.т.н., проф. В.И. Балабановым и к.т.н. В.Н. Быстровым разработано специальное устройство Д. 91 (Патент СССР 1834913) (рис. 1.13), которое работает за счет возвратно-поступательного перемещения в автоматическом режиме и применения натирающих инструментов в виде пластин трапецеидальной формы и содержит корпус 1, щеки 2 с пазами для ограничения угла поворота натирающих инструментов и со сферическими углублениями под державки 3 в виде цилиндров, один торец которых выполнен с пазом, а другой со сферической поверхностью и глухим отверстием с резьбой, натирающие инструменты 4 в виде пластин трапецеидальной формы, фиксаторы 5, винты 6, фторопластовые подшипники скольжения 7, регулировочный винт 8, гайку 9, пружину 10 и тампон 11 [8, 11, 85].

Устройство может применяться с любыми приспособлениями, способными удерживать и вращать обрабатываемую деталь, например, токарный или шлифовальный станок, полировальные и притирочные автоматы и т.д.

Принцип работы устройства для фрикционно–механического нанесения покрытий следующий. Коленчатый вал 12 устанавливается в механизм вращения (на рис. 1.13 не показан). В державки 3 устанавливаются натирающие инструменты 4 и крепятся фиксаторами 5. Затем державки натирающих инструментов (в сборе) устанавливаются в сферические углубления щек 2 и закрепляются через подшипники скольжения 7, винтами 6. Тампон 11 пропитывается технологической жидкостью (например, СФП–3). Осуществляется наладка устройства путем установки натирающих инструментов 4 в крайнее положение до упора в пазах щек 2. Щеки 2 приводятся в соприкосновение с поверхностью обрабатываемой шейки коленчатого вала. Вращением гайки 9 по регулировочному винту 8 осуществляется сжатие пружины 10 на необходимую величину для

прижатия натирающих инструментов 4 к поверхности шейки 12 с определенным усилием. Включается механизм вращения детали (на рис. 1.13 не показан), при котором происходит натирание ее поверхности. Расположение натирающих инструментов 4 под углом к оси обрабатываемой детали 12 обеспечивает перемещение устройства относительно обрабатываемой поверхности. При соприкосновении кромок натирающих инструментов 4 с галтелью торца, перемещение прекращается, производится обработка поверхности галтели коленчатого вала и последующий разворот натирающих инструментов 4 вместе с державкой 3 в шарнирном соединении со щекой 2 до упора в противоположном выступе паза щеки. В результате автоматической переустановки натирающих инструментов 4, осуществляется движение устройства в обратном направлении до соприкосновения с противоположным торцом обрабатываемой шейки коленчатого вала. При продолжении обработки поверхности шейки, указанный выше цикл движения повторяется. Возвратно–поступательное движение устройства в автоматическом режиме осуществляется до достижения необходимой толщины, а также качества покрытия [8, 11, 85].

К главным недостаткам разработанного устройства следует отнести относительно невысокую надежность крепления натирающих инструментов в державках, что требует дополнительной конструкторской доработки.

В МГАУ им. В. П. Горячкина также было сконструировано специальное устройство на базе суперфинишной головки для натирания композиционных противоизносных покрытий на шейки коленчатого вала.

Коленчатый вал (12) устанавливается на станок, а на одну или несколько шеек коленчатого вала устанавливается одно или несколько приспособлений для фрикционно–механического нанесения покрытий (рис. 1.14). Натирающие покрытие инструменты изготовлены из следующих пластичных материалов: медь, латунь, баббит (рис. 1.14) [106].

Применение натирающих инструментов из различных пластичных конструкционных материалов позволяет получать композиционные антифрикционные покрытия с высокими триботехническими характеристиками, в том числе

протизадирными свойствами.

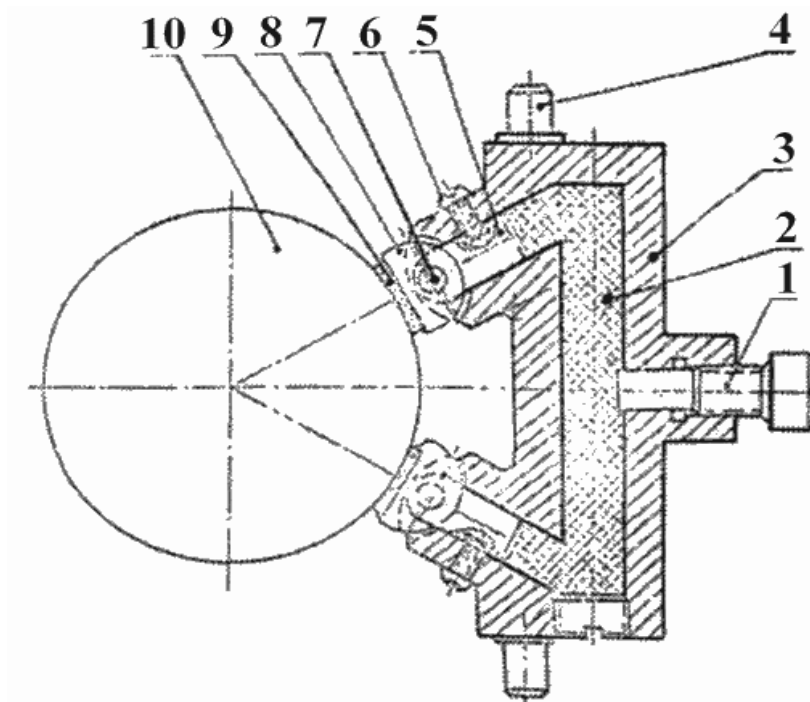


Рисунок 1.12 – Суперфинишная головка с шарнирным креплением натирающих инструментов:

1 – винт; 2 – гидропластмасса; 3 – корпус державки; 4 – цапфа; 5 – поршень; 6 – винт; 7 – штифт; 8 – колодка; 9 – натирающий инструмент; 10 – вал

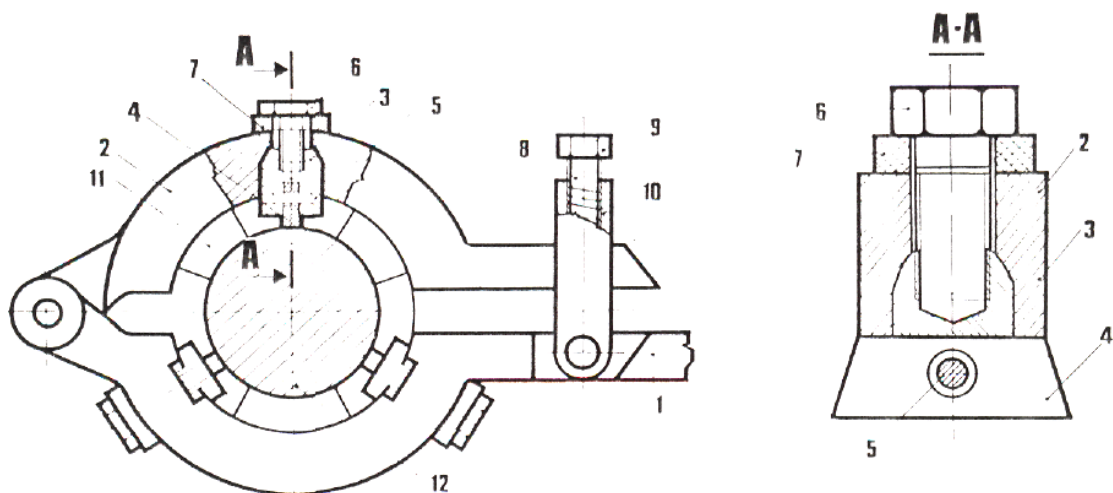


Рисунок 1.13 – Схема устройства для ФАБО коленчатых валов Д. 91 [85]:

1 – корпус; 2 – щеки; 3 – державки; 4 – натирающие инструменты; 5 – фиксатор; 6 – винты; 7 – подшипник скольжения; 8 – регулировочный винт; 9 – гайка; 10 – пружина; 11 – тампон; 12 – деталь

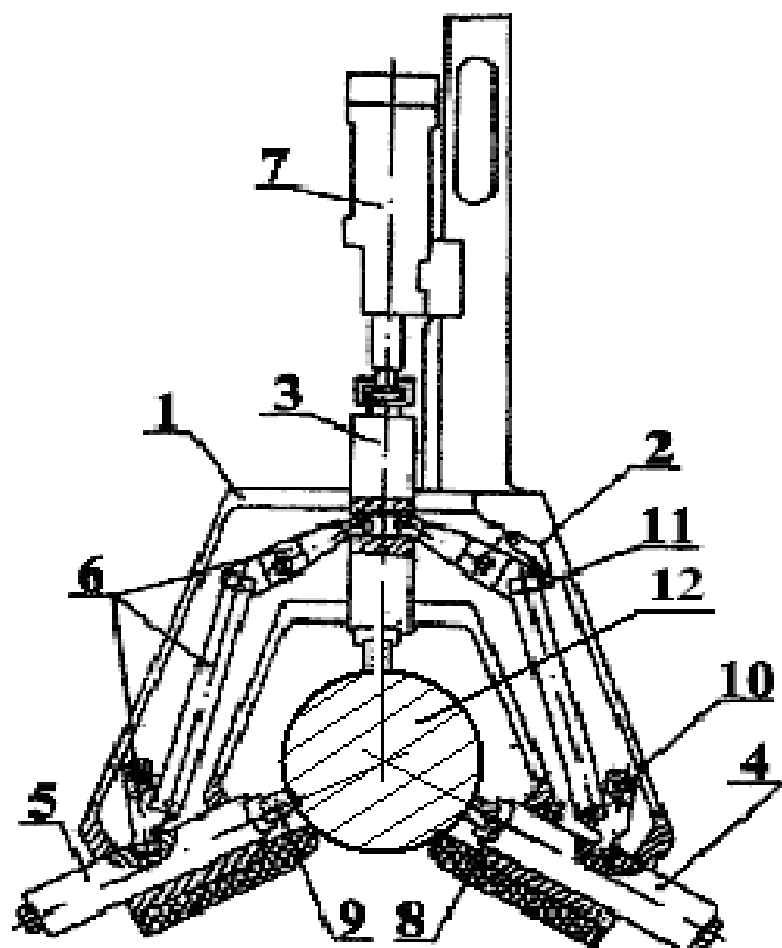
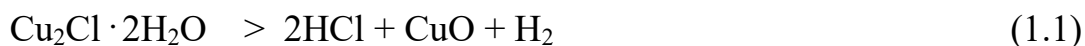


Рисунок 1.14 – Устройство для нанесения композиционных антифрикционных покрытий на шейки коленчатого вала на базе суперфинишной головки:
 1 – корпус; 2 – крышка; 3, 4, 5 – ползуны; 6 – система рычагов; 7 – гидроцилиндр; 8 – державка; 9 – натирающие инструменты из пластичных металлов;
 10 – штифт опоры; 11 – штифт шарнира; 12 – коленчатый вал

1.4. Технологические среды для нанесения покрытий трением

Практически во всех технологических жидкостях используется глицерин, который в результате трибодеструкции на поверхностях контактирующих тел (деталь–инструмент) окисляется в глицериновый альдегид, акролеин, формальдегид, глицериновую кислоту и другие продукты с меньшей, чем у глицерина молекулярной массой [11-12, 27-28, 32-34, 74-78, 117, 123].

При фрикционно-химическом нанесении покрытий в металлоплакирующих средах используются различные соли пластичных металлов, например, хлорид меди (II). В процессе обработки происходит гидролиз солей с образованием кислот [8, 11]:



Образовавшаяся соляная кислота способствует удалению оксидных пленок, а на обрабатываемой поверхности в результате взаимодействия с оксидами железа образуются защитные слои из хлоридов железа.

Происходит восстановление продуктов коррозии и растворение активных металлов и их соединений. Взаимодействие продуктов превращения глицерина и других органических веществ, содержащихся в технологических средах, приводит также к образованию высокомолекулярных полимеров трения [8, 11].

Таким образом, при ФАБО на обрабатываемой детали формируются равномерные антифрикционные покрытия из пластичных металлов и полимерных компонентов на его поверхности. В процессе эксплуатации, под действием поверхностно-активных веществ (ПАВ), содержащихся в моторном масле, происходит избирательное растворение нанесенного материала с образованием тонких медных покрытий с высокими антифрикционными и протиизносными свойствами [8, 11].

Лабораторные триботехнические испытания деталей с латунными покрытиями, нанесенными в среде глицерина, указывают на их недостаточные противозадирные и противоизносные свойства, поэтому в настоящее время чистый глицерин в качестве технологической среды практически не применяется.

В целях лучшего удаления оксидных пленок при применении неметаллического натирающего инструмента при ФАБО в металлоплакирующих средах иногда применяется мелкодисперсный оксид кремния [11, 75].

Однако, несмотря на ряд положительных факторов, состав недостаточно транспортируем, существует опасность абразивного действия оксида кремния на уже нанесенное покрытие, а также в случае его затираания в пластичное покрытие

– на сопрягаемую поверхность при эксплуатации.

Итак, повышение качества покрытия определенным образом зависит от срабатывания четырех каналов активации контактных поверхностей: механического, химического, термического вакансионно-дислокационного канала [11].

Наиболее полное срабатывание каналов, а, следовательно, и интенсификация фрикционного латунирования, обеспечивается за счет проведения процесса нанесения трибопокрытия при оптимальных нагрузочно–скоростных режимах обработки и эффективном составе технологической среды.

Обработка производится до получения равномерного покрытия без пропусков и крупных частиц перенесенного металла. Обработанные поверхности моются 5 %-ным раствором глицерина в воде и сушатся. После чего привод станка выключается, коленчатый вал снимается со станка.

Предлагаемый способ обработки по литературным данным должен обеспечивать: уменьшение шероховатости обработанной поверхности; упрочнение подповерхностного слоя за счет наклепа; образование в результате диффузии материалов в подложку антиизносной композиционной структуры; защиту от водородного изнашивания; наличие на обработанных поверхностях слоя антифрикционного многослойного покрытия, что благоприятно воздействует на вкладыши коленчатого вала, вследствие частичного переноса на них с обработанных шеек пластичного покрытия при их эксплуатации.

Известна поверхностно–активная среда для нанесения натиранием покрытий из меди и медных сплавов, содержащая соляную кислоту и глицерин, которая в целях повышения качества покрытия дополнительно включает олеиновую кислоту и изопропиловый спирт при следующем соотношении компонентов (табл. 1.7) [11, 75].

К недостаткам данной среды следует отнести наличие в среде соляной кислоты, которая наряду с высокой поверхностной активностью склонна к коррозии нанесенного покрытия и требует тщательной промывки изделия после обработки. Высокая вязкость состава создает трудности с его использованием в циркуляционных установках подачи смазочно-охлаждающих технологических сред

(СОТС) станков.

Таблица 1.6 –Metalлоплакирующая среда для нанесения покрытий [11,75]

№ п/п	Компонент	Содержание, масс. %
1	Хлорид меди	0,5...5,0
2	Глюкоза	0,5...3,0
3	Оксид кремния	1...4
4	Глицерин	Остальное

Таблица 1.7 – Среда для нанесения покрытий натиранием [11,75]

№ п/п	Компонент	Содержание, масс. %
1	Олеиновая кислота	0,8...1,0
2	Изопропиловый спирт	4,0...7,0
3	Соляная кислота (уд. вес 1,19 г/см ³)	2,0...3,0
4	Глицерин	остальное

В некоторых случаях применяются специальные технологические среды на масляной основе, что для общего случая ФАБО не характерно. Так, при безабразивной обработке лезвия инструмента машин скользящего резания кожевенно-обувных и текстильных материалов, проводимую специальным инструментом в режиме обкатывания с проскальзыванием, в зону деформации подавали «смазочный материал», состоящий из масла И–8А с металлоплакирующей присадкой (МПП) на основе олеата меди (1) в количестве 0,15 весового процента. В этом случае нанесенный слой меди может быть обнаружен только при спектральном анализе с помощью электронного микроскопа с рентгеновским микроанализатором [27-28].

Обработка, стали 4X10C2M в среде, состоящей из глицерина и хлористого цинка (2:1), при скорости скольжения 0,22 м/с, скорости подачи инструмента 0,15 мм/об и давлении прижима латунного прутка 70 МПа, позволяет получить покрытие сплошным, одинаковой плотности, цвета исходной латуни с параметром шероховатости равным исходному. Толщина покрытия, по данным авторов,

составила 12 мкм.

В среде глицерина и соляной кислоты качество покрытия на поверхности стали марки 4Х10С2М приближается к предыдущему случаю. В тоже время, цвет его отличается от исходного цвета латуни и получается красного цвета. Применение растворов хлористого цинка или соляной кислоты в глицерине для латунирования высоколегированных сталей типа 1Х18Н9Т не приводит к получению высококачественного покрытия. В этом случае активизация процесса нанесения осуществляется посредством применения технологических сред на основе ортофосфорной кислоты (табл. 1.8) [27-28].

Таблица 1.8 – Среда для латунирования высоколегированных сталей [11,75]

№ п/п	Компонент	Содержание, мл
1	Ортофосфорная кислота	10,0
2	Анилин	40,0
3	Глицерин	50,0

Режимы обработки с данной средой следующие: скорость скольжения 0,1 м/с, подача – 0,8 мм/об, давление прижима – 70 МПа. Следует помнить, что применение ортофосфорной кислоты и анилина требует соблюдения специальных мер предосторожности, поэтому для широкого применения данные составы не пригодны и в практике не применяется.

Известен состав, применяемый для ФАБО медномолибденовыми брусками гильз цилиндров ДВС, состоящий из следующих компонентов (табл. 1.9). Эксплуатационные испытания ДВС с гильзами, подвергшимися ФАБО с использованием данного состава, показывают увеличение ресурса дизелей до 1,4 раза. В то же время, по данным автора разработки, процесс нанесения качественного покрытия на гильзу цилиндра требует 25...30 проходов натирающего инструмента, что говорит о недостаточной поверхностной активности технологической среды [54, 67, 77-80, 84, 92].

Известна также технологическая жидкость, разработанная в НИИАТ, предназначенная для нанесения металлических покрытий трением на стальные детали. Технологическая жидкость содержит хлористый цинк, хлорную медь и хлорное железо, двуххлористое олово, глицерин и мочевины. Наряду с высокими антифрикционными и приработочными свойствами получаемых с ее использованием покрытий, следует отметить наличие в составе достаточно большого ассортимента компонентов, что создает определенные трудности с его серийным производством и ряд других отрицательных факторов, обусловленных наличием в жидкости мочевины [11, 109].

Таблица 1.9 – Состав для ФАБО гильз цилиндров молибденовыми брусками [54, 67, 77-80, 84, 92]

№ п/п	Компонент	Содержание, масс. %
1	Хлорид меди	3,0...5,0
2	Эмульсол НГЛ–205	3,0...5,0
3	Глицерин	35,0...45,0
4	Вода	остальное

В МГАУ им. В.П. Горячкина под руководством д.т.н., профессора В.И. Балабанова разработана группа отечественных технологических жидкостей СФП–2 и СФП–3. По данным автора [11, 86], в качестве прототипа для их создания взята технологическая жидкость FRT1, разработки д.т.н., профессора Г. Польцера (г. Цвикау, Германия) [91, 129, 132-134].

Среда СФП-2 (табл. 1.10) содержит глюкозу, глицерин, хлорид олова или цинка в воде, а состав СФП-3 (табл. 1.11) включает в себя соляную кислоту, соли никеля, олова, меди, а также глицерин и глюкозу, растворенные в воде.

Проведенный литературно-патентный анализ имеющихся составов позволил сформулировать основные функциональные требования, предъявляемые к технологическим жидкостям (средам) для ФАБО [8, 11]:

- содержание в составе достаточного количества ПАВ, позволяющих разрыхлить оксидные пленки и пластифицировать обрабатываемую поверхность и натирающий инструмент;
- присутствие органических материалов, в процессе нанесения способных при взаимодействии с другими компонентами состава, к полимеризации и образованию на поверхности медьсодержащего покрытия полимерной пленки;
- наличие соединений металлов (в основном пластичных) для получения композиционных покрытий с заданными свойствами;
- компоненты среды должны находиться в растворенном виде для обеспечения хорошей транспортируемости состава подающими устройствами в зону обработки, для чего необходим соответствующий универсальный растворитель.

Таблица 1.10 – Состав для нанесения покрытий СФП-2 [11, 86]

№ п/п	Компонент	Содержание масс., %
1	Хлориды олова или цинка	1,5...5,0
2	Глюкоза	0,5...3,0
3	Глицерин	35...45
4	Вода	Остальное

Таблица 1.11 – Состав для нанесения покрытий СФП-3 [11, 86]

№ п/п	Компонент	Содержание, масс. %
1	Соляная кислота	1,0...3,0
2	Соли никеля	3,0...5,0
3	Соли олова	3,0...5,0
4	Соли меди	3,0...5,0
5	Глюкоза	5,0...10,0
6	Глицерин	40,0...50,0
7	Вода	остальное

В то же время, к технологическим жидкостям для ФАБО трущихся поверхностей предъявляется еще ряд технологических требований: оптимальная вязкость; безопасность обращения; стабильность; низкая коррозионная активность и ряд других [11].

Однако главным критерием качества технологической среды является комплекс триботехнических свойств покрытий, получаемых с ее использованием. Трибологические свойства покрытий, в свою очередь, оцениваются по следующим основным показателям: равномерность нанесенных покрытий; маслосмолестойкость (пористость); шероховатость; толщина покрытия; износостойкость [8,11].

На основании проведенного литературно-патентного анализа установлено, что одним из главных факторов, влияющих на эффективность ФАБО, является химическая активность технологических сред для нанесения, разработка и применение которых может позволить повысить износостойкость обработанных шеек коленчатого вала [8, 11, 13, 17-19, 21, 94-95, 114, 126].

1.4. Выводы по главе 1. Цель и задачи исследования

1. Анализ данных эксплуатации капитально отремонтированной АТТ позволил установить недостаточную износостойкость коренных и шатунных шеек коленчатых валов ДВС, восстановленных различными способами, что приводит к снижению межремонтного ресурса двигателя в целом в 1,5...2 раза.

2. Анализ литературных источников, технологий ремонта и данных эксплуатации АТТ позволил установить, что наиболее прогрессивными технологиями восстановления шеек коленчатых валов ДВС являются плазменное и газоплазменное напыления, а самым дешевым и распространенным способом – шлифование под ремонтный размер.

3. Улучшение качества наносимых покрытий (прочности сцепления и плотности покрытия) может быть достигнуто благодаря разработке и применению новых технических решений, снижающих потери тепловой энергии, а также использованию новых композиционных материалов с высокими прочностными, антифрикционными и противоизносными свойствами.

4. Недостатками шлифования шеек под ремонтный размер является удаление термообработанного поверхностного слоя обрабатываемых деталей, подрез краев галтелей, а также снижение усталостной прочности восстановленных коленчатых валов.

5. Повышение износостойкости восстановленных поверхностей трения, в том числе шеек коленчатых валов может быть обеспечено за счет фрикционно-механического (при помощи трения) нанесения антиизносных, антифрикционных покрытий в процессе ФАБО.

6. Установлено, что одним из главных факторов, влияющих на эффективность ФАБО, является химическая активность технологических сред для нанесения, разработка и применение которых может позволить повысить износостойкость обработанных шеек коленчатого вала.

В связи с этим целью исследований является 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.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ НАНЕСЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ТРЕНИЕМ

2.1. Теоретический расчет необходимого давления для нанесения антифрикционных покрытий на шейки коленчатого вала

На основании литературно-патентного анализа, а также теоретических исследований в области трибологии сформулированы основные требования к оптимизации режимов нанесения антифрикционных медьсодержащих покрытий. Установлено, что для получения качественных антифрикционных антиизносных, антифрикционных покрытий существенное влияние оказывают следующие основные факторы [11, 17-19, 21, 32-35, 45-48, 70, 113-114]:

- адгезионная совместимость между наносимым материалом и обрабатываемой поверхностью;
- элементный, структурный и фазовый состав обрабатываемой поверхности;
- конструктивные особенности трущихся соединений;
- подготовительная (предварительная) обработка;
- качество обрабатываемой поверхности (шероховатость, отсутствие коррозии и т.д.).

Известно, что формирование антифрикционных покрытий при ФАБО происходят вследствие протекания физико-химических процессов. Фрикционное нанесение покрытий при ФАБО (т.е. нанесение при помощи трения) имеет характерные особенности, аналогичные тем процессам, которые протекают при сварке трением. Такие как: предварительная активация поверхности, наличие прижимающих усилий, относительное перемещение поверхностей друг относительно друга. Вследствие этого происходит разогрев контактирующих участков, образование ювенильных поверхностей (свободных от окисных и смазочных пленок), схватывание и т.д. В результате чего материал с натирающего инструмента, изготовленного из пластичного металла, переносится на обрабатываемую

деталь [11, 49, 114, 106–107, 118–119, 256].

Повышение производительности процесса нанесения покрытия и улучшение его качества в большой степени зависят от интенсивности и полноты протекания стадий образования физического контакта и активации контактных поверхностей.

Современной науке известны четыре канала (фактора) активации контактных поверхностей: механический, термический, химический и канал, связанный с высвобождением энергии при выходе на поверхность в результате микропластической деформации структурных дефектов, типа: дислокаций, вакансий и межузельных атомов, который можно назвать вакансионно-дислокационным каналом. Данные факторы тесно связаны между собой и очевидно, что образование качественного покрытия возможно при их полной реализации в процессе фрикционного нанесения покрытий [17, 44, 59, 93, 117].

Активация контактных поверхностей, в общем виде, способствует образованию межатомных связей в системе «подложка – материал покрытия», но предварительно необходимо, чтобы произошла диссоциация связей в системе «атом металла – атом кислорода».

Срабатывание механического канала активации в процессе нанесения покрытий трением происходит в результате фрикционного воздействия, способного частично или полностью разрушить слой оксида или химически адсорбированного кислорода. В первоначальный период ФАБО хрупкий слой оксида на поверхности трения подвергается значительному воздействию сдвиговых деформаций, вследствие чего происходит его разрушение и вынос из зоны контакта.

На обнажившихся ювенильных поверхностях возможно образование связей типа « $Me^* - Me^{**}$ » между атомами металлов с ненасыщенными связями. Следует иметь в виду, что длительность нахождения атомов в активированном состоянии крайне мала, и возможно вновь образование связей типа « $Me^* - O$ ». Однако использование в процессе ФАБО специальных технологических сред предохраняет контактную поверхность от окисления, что значительно снижает

требуемые деформационно–скоростные условия образования соединения, по сравнению со способами сварки и наплавки трением.

Усилие прижатия инструмента и скорость его перемещения вдоль обрабатываемой поверхности, определяют величину удельной теплоты трения, а, следовательно, и температуру поверхностей контакта. Повышение температуры в локальных поверхностях контакта способствует возбуждению поверхностных атомов металлов, участвующих во фрикционном взаимодействии, что облегчает разрушение связей типа « $Me^* - O$ » и обеспечивает срабатывание термического канала активации.

Для удобства дальнейших рассуждений в работах [11,114] был введен безразмерный коэффициент T , который представляется в следующем виде:

$$T = (\sigma_{mn} / \sigma_{mo}) \approx 1, \quad (2.1)$$

где T – коэффициент степени деформации контактирующих материалов (оптимальных условий образования качественных антифрикционных покрытий); σ_{mn} и σ_{mo} – соответственно, физические пределы текучести материалов покрытия и основы при определенных термо–деформационных параметрах процесса нанесения (контакта).

Вариант, когда $T < 1$ свидетельствует о том, что выбранные деформационно-скоростные характеристики процесса нанесения покрытия не обеспечивают высокой производительности и качества покрытия. Вариант если $T > 1$ велика вероятность деформации инструмента из наносимого материала.

С увеличением температуры, вызванным тепловыделением при деформации, сопровождаемой скольжением, происходит увеличение числа структурных дефектов, вовлекаемых в процесс контактирования. Кроме того, микропластическая деформация локальных контактных поверхностей, наблюдаемая при трении, связана с перемещением структурных дефектов. Дефекты выходящие на поверхность, выносят с собой энергию, способную разрушить связи типа « $Me^* - O$ » [17, 44, 59, 93, 117].

Современные научные представления предполагают, что из всех структурных дефектов доминирующее влияние на процесс активации контактных поверхностей оказывают дислокации. Величина энергии, выносимой на поверхность дислокациями на 1–2 порядка выше, чем выносимой вакансиями.

Наблюдаемое при фрикционном латунировании упрочнение субповерхностного слоя, описанное в работах [11, 80, 84], свидетельствует о том, что микропластическая деформация вызывает дислокационное скопление вблизи поверхности, а это подтверждает задействование в процессе нанесения трибопокрытия канала, связанного с выходом на поверхность структурных дефектов.

Важное влияние на процесс формирования трибопокрытий оказывает присутствие в зоне контакта технологической среды. В составы известных технологических жидкостей [11, 12, 64] входят поверхностно-активные вещества. Они содержатся или в чистом виде, как олеиновая кислота и др., или в виде компонентов, способных образовывать ПАВ в процессе трибодеструкции среды. Молекулы ПАВ в процессе адсорбции способны проникать в поверхностные трещины материала и, химически взаимодействуя с ним, «расклинивать» трещины, способствуя уменьшению прочности поверхностных оксидных слоев.

Таким образом, интенсификация нанесения покрытия может быть реализована за счет задействования в процессе четырех каналов активации контактных поверхностей. Химический канал реализуется за счет введения в состав технологической среды восстановителя меди и солей металлов покрытия (медь, олово, цинк). Механический и канал, связанный с пластической деформацией, срабатывают в результате значительных сдвиговых деформаций, возникающих в результате фрикционного взаимодействия. Термический канал связан с нагрузочно-скоростным режимом обработки, определяющим мощность тепловыделения в контактной области.

Выход на оптимальные нагрузочно-скоростные параметры и применение эффективной технологической среды позволит получить качественное покрытие в сочетании с высокой производительностью процесса нанесения покрытия.

Одной из особенностей фрикционного контакта является существенное отличие свойств поверхностных слоев контактирующих тел от аналогичных свойств металла в объеме. Это позволяет предположить, что в процессе нанесения покрытий трением поверхностные слои подвергаются значительным контактным нагрузкам с быстрым изменением температуры, вызывающими микропластическую деформацию в «приконтактных» областях. Так как теория взаимодействия твердых тел при упругопластических деформациях практически не разработана, воспользуемся некоторыми выражениями по расчету основных характеристик фрикционного взаимодействия для случая пластически насыщенного контакта.

Следует согласиться с утверждением, что приближенно пластические деформации возникают в тех точках, где нормальные напряжения на контакте равны давлению текучести (физическому пределу текучести σ_m). Однако ряд пластичных материалов, в том числе медные сплавы, не имеют фактической площадки предела текучести. Поэтому для параметра, характеризующего покрытие, нами предложено использовать предел прочности (σ_b), как имеющего реальные значения для применяемых пластичных материалов натирающих инструментов и более полно характеризующего напряженное состояние зоны контакта.

В дальнейшем, анализируя теоретические условия, а также результаты опытных операций нанесения антифрикционных покрытий, нами отмечено, что, так как, покрытия образуются из конструкционных материалов, обладающих высокой пластичностью в широком диапазоне нагрузок, то коэффициент степени деформации контактирующих материалов (T) примет следующий вид:

$$T = (\sigma_{bn} / \sigma_{bo}) \approx 1, \quad (2.2)$$

где σ_{bn} , σ_{bo} – средний предел прочности материалов покрытия и основы; МПа.

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):

$$P_c \leq (0,125 \sigma_T / \delta^2) (1 - 6\tau_n / \sigma_T)^2, \quad (2.3)$$

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 ($\tau_n = 0,3 \sigma_\sigma$), 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:

$$P_c \leq (0,125 \sigma_\sigma / \delta^2) (1 - 6 \tau_n / \sigma_\sigma)^2. \quad (2.4)$$

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 ($\sigma_{\sigma 1} = 360$ МПа) и алюминиевый сплав АД-31 ($\sigma_{\sigma 2} = 200$ МПа), для простоты расчетов предлагается использовать их среднее значение, определяемое по формуле:

$$\sigma_{\sigma \text{ср}} = \frac{1}{2} (\sigma_{\sigma 1} + \sigma_{\sigma 2}). \quad (2.5)$$

$$\sigma_{\sigma \text{ср}} = \frac{1}{2} (360 + 200) = 280. \quad (2.6)$$

В этом случае расчетная формула (2.4) примет следующий вид

$$P_p \leq K_i \cdot (0,125 \sigma_{вср} / \delta^2) \cdot (1 - 6\tau_n / \sigma_{вср})^2, \quad (2.7)$$

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

$$P_p = \frac{1}{2} (0,125 \cdot 280 / 0,8^2) \cdot (1 - 504 / 280)^2 = 17,5 \text{ МПа}. \quad (2.8)$$

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 [13, 15].

2.2. Разработка технологических жидкостей для фрикционного нанесения покрытий

Процесс нанесения покрытий при ФАБО осуществляется за счет использования явления переноса и (или) восстановления металла при трении в присутствии технологической среды, содержащей соли металла покрытий, способные к реакции замещения в системе « $Me^* - O$ » (восстановительной реакции).

В качестве материала натирающего инструмента используется пластич-

ные металлы, составляющие основу покрытия, а восстановление и осаждение содержащейся в составе соли меди, олова, цинка и хрома позволяет получить более равномерное покрытие с высокими антифрикционными и антиизносными свойствами. Данные составы могут также применяться для нанесения покрытий немедьсодержащим, а также неметаллическим рабочим инструментом только за счет восстановления солей, содержащихся в данных составах.

Теоретический анализ литературных источников по процессу нанесения фрикционных покрытий методом ФАБО показал, что повышение их износостойкости достигается за счёт активного действия четырёх основных факторов нанесения: химического, механического, вакансионно-дислокационного и термического. Для реализации этих факторов и улучшения качества покрытия потребовалось разработать новую технологическую жидкость (среду) [8, 11].

Для активации химического канала образования композиционных покрытий трением на шейки коленчатого вала в диссертации разработана технологическая жидкость для фрикционного нанесения покрытий (Патент на изобретение RU № 2821971) [17-18, 43].

Целью настоящего исследования являлась разработка эффективного технологического состава для фрикционно-механического нанесения покрытий, обладающего улучшенными антифрикционными и противоизносными свойствами за счёт включения солей алюминия, меди, никеля и олова, а также устранения недостатков известных аналогов (коррозионная агрессивность, высокая вязкость, низкая эффективность восстановления металлов) [17-18, 43].

Существуют известные среды с поверхностно-активными компонентами, применяемые для нанесения меди и медных сплавов методом натирания. Такие среды включают хлорид олова или хлорид цинка, глюкозу, глицерин и воду. Однако их недостатком является отсутствие в составе медных солей, что ограничивает качество покрытия и ухудшает его антифрикционные и износостойкие характеристики [[17-18, 43].

Известна поверхностно-активная среда для нанесения натиранием покрытий из меди и их сплавов, включающая хлорид олова или хлорид цинка, глюкозу,

глицерин и воду. Недостатком данной среды является отсутствие солей меди, что не позволяет получать покрытие более высокого качества с лучшими антифрикционными и противоизносными свойствами [[17-18, 43].

Известна технологическая среда, содержащая соляную кислоту, соли никеля, олова и меди, глюкозу, глицерин и воду, служащую для повышения износостойкости поверхности катания колесной пары железнодорожного транспорта за счет нанесения на них антифрикционных медьсодержащих покрытий. Недостатком известного состава является наличие в среде соляной кислоты, что требует соблюдение повышенных мер безопасности при ее использовании. Соляная кислота оказывает коррозионное влияние на нанесенное покрытие, что требует проведение дополнительных операций по очистке (мойке) и консервации (защите) обработанных деталей, а также приводит к снижению антифрикционных и противоизносных свойств полученных покрытий. Глюкоза обладает недостаточными восстанавливающими свойствами, а также повышает вязкость состава, что создает трудности с применением состава в циркуляционных системах подачи смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) металлообрабатывающих станков [17-18, 43].

Из анализа известных аналогичных технических решений выявлено, что технической проблемой в данной области является необходимость расширения арсенала средств, обеспечивающих получение содержащих алюминий покрытий с повышенными антифрикционными, противоизносными свойствами.

Техническим результатом применения состава является обеспечение снижения коэффициента трения обработанных подвижных деталей на 50...60%, а износа образцов более чем в 2 раза.

Для решения указанной проблемы и достижения заявленного технического результата состав для фрикционно-механического нанесения покрытий, включающий соли меди, никеля и олова, глюкозу, глицерин и воду, который может применяться для нанесения покрытий из алюминиевых сплавов, отличается тем, что дополнительно содержит соли алюминия, в следующем соотношении компонентов, мас. %: (таблица 2.1) [17-18, 43].

Таблица 2.1 – Состав для фрикционно-механического нанесения покрытий
натирающим инструментом (фрикционного алитирования)

Патент на изобретение RU № 2821971 [17]

№ п/п	Компонент	Содержание, масс. %
1	Соли меди	0,5...1,0
2	Соли олова	0,3...1,0
3	Соли никеля	0,3...1,0
4	Соли алюминия	0,3...1,0
5	Глюкоза	3,0...5,0
6	Глицерин	30,0...40,0
7	Вода	остальное

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 используется медь (латунь, бронза), алюминий и их сплавы, составляющие основу покрытия, а восстановление и осаждение содержащейся в составе соли меди, олова, никеля и алюминия позволяет получить более равномерное покрытие с высокими антифрикционными и антиизносными свойствами [17-18, 43].

Данный состав может также применяться для нанесения покрытий алюминийсодержащим (например, прутком марок сплавов АД1 ГОСТ 21488-97, АД-31 ГОСТ 4782-97) или неметаллическим рабочим инструментом за счет восстановления солей, содержащихся в данном составе [17-18, 43].

При этом за счет снижения дополнительных операций по очистке (мойке) и консервации (защите) получаемых покрытий повышается производительность технологического процесса их фрикционно-механического нанесения.

Количественное содержание элементов обусловлено следующим. Суммар-

ное количество солей металлов ниже 1,0% не обеспечивает формирования покрытия с высокими противозадирными свойствами. Суммарное содержание солей выше 5,0% приводит к усилению коррозионного действия состава на обрабатываемую поверхность и ведет к перерасходу составляющей [17-18, 43].

Наличие в составе солей алюминия обеспечивает повышение антифрикционных и противоизносных свойств получаемых покрытий.

Содержание глюкозы ниже 6% не обеспечивает восстановления достаточного количества металла из состава. Содержание восстановителя более 10% не улучшает свойств покрытия и существенного роста производительности процесса нанесения покрытия, а в то же время ведет к перерасходу составляющей [17-18, 43].

Содержание глицерина в количестве 30...40% обеспечивает оптимальную вязкость состава и необходимую концентрацию поверхностно-активных веществ, образующихся в результате трибодеструкции глицерина [17-18, 43].

Вода и глицерин оказывают охлаждающее действие, обладают хорошей растворяющей способностью по отношению к другим компонентам состава и существенно уменьшают вязкость, что позволяет использовать состав в системах подачи СОТС [17-18, 43].

Нанесение покрытий осуществляется при скорости скольжения натирающего инструмента 0,1...0,3 м/с. Уменьшение скорости обработки снижает производительность процесса, а увеличение ведет к снижению качества покрытия и в последующем противозадирных свойств. Удельное давление натирающего инструмента, обеспечивающее формирование равномерного покрытия красноватого цвета и, находится в пределах 10...17 МПа. Обработка на данных режимах позволяет за 2...3 прохода инструмента получать покрытия с заданным параметром шероховатости поверхности, равной исходной шероховатости [17-18, 43].

Фрикционно-механическое нанесение покрытия с использованием разработанного состава помимо химической активации поверхности органическими веществами включает также воздействие за счёт механического (удаление оксидных плёнок и уплотнение подповерхностных слоёв) и теплового (локальный

нагрев зоны контакта) факторов. В результате формируется композиционное покрытие на основе меди, обогащённое алюминием и оловом в поверхностном слое. Такое покрытие обладает улучшенными антифрикционными и износостойкими характеристиками и не требует последующей очистки или дополнительной защиты [17-18, 43].

Образцы состава для фрикционно-механического нанесения покрытий исследовали с использованием триботехнических методов на машине трения марки «Timken-machine» по схеме «диск – палец» (Сталь 45 ГОСТ 1050-2013 - алюминиевый антифрикционный сплав АО-20-1 ГОСТ 14113-78).

Вместо смазочного материала в кювету заливалась разработанная технологическая жидкость (Патент на изобретение RU № 2821971).

Параметры шероховатости определялись с помощью профилометра ВЭИ-201 производства завода «Калибр». Антифрикционные свойства оценивались по величине коэффициента трения по завершении трёхчасового испытания, зафиксированной потенциометром КСП-4. Степень износа образцов определяли весовым методом с использованием аналитических весов WA-21 (Польша) с точностью до 0,0001 г. Оценку равномерности покрытия проводили визуально с применением четырёхкратной лупы. Испытания выполнялись при постоянной нагрузке 5 МПа, линейной скорости скольжения 3,6 м/с и капельной подаче моторного масла М-10-Г2к со скоростью 0,085 мл/с [17-18, 43].

Также установлено, что покрытия, полученные с использованием предлагаемого состава, по сравнению с покрытием, полученным при использовании известных ранее составов и сред: 1) более равномерные, 2) имеют шероховатость, близкую к шероховатости исходной поверхности, 3) могут обходиться без дополнительной очистки (мойки) и консервации (защиты) [17-18, 43].

Полный анализ испытаний показывает, что покрытия, полученные с использованием предлагаемого состава, обладают лучшими антифрикционными и противоизносными свойствами, по сравнению с покрытиями, полученными с использованием ранее известных составов и сред.

Анализ существующих технических решений показал, что одной из ключевых проблем в этой области является необходимость расширения средств, способных обеспечивать формирование алюминийсодержащих покрытий с улучшенными антифрикционными и износостойкими характеристиками.

Использование предлагаемого состава позволяет снизить коэффициент трения подвижных деталей и уменьшить их износ.

Фрикционно–механическое нанесение покрытия с использованием предлагаемого состава, кроме химического активирования поверхности органическими компонентами, обеспечивает дополнительную активацию процесса за счет срабатывания механического канала (разрушение оксидных пленок в зоне контакта и пластического деформирования (наклепа) подповерхностных слоев) и термического канала (интенсивный разогрев контактируемых участков обрабатываемой поверхности). В результате обработки с использованием предлагаемого состава образующееся покрытие представляет собой композиционный медьсодержащий материал, обогащенный вблизи свободной поверхности алюминием. Таким образом, в покрытии обеспечиваются высокие антифрикционные и противоизносные свойства [17-18, 43].

При этом за счет снижения дополнительных операций по очистке (мойке) и консервации (защите) получаемых покрытий повышается производительность технологического процесса их фрикционно–механического нанесения.

Полученные результаты триботехнических испытаний, выявившие возможность повышения износостойкости нанесенных покрытий с применением среды показали, что возможность дальнейшего улучшения качества антифрикционных покрытий за счет оптимизации технологических сред (активации химического канала нанесения) практически исчерпано.

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) [27, 78].

2.3. Разработка технологии нанесения композиционных антифрикционных покрытий на шейки коленчатого вала

Проведем проверочный расчет теоретически выведенной зависимости для определения необходимого контурного давления для фрикционного нанесения качественных композиционных покрытий методом ФАБО к конкретным условиям обработки.

Приближенный расчет коэффициента степени деформации контактирующих материалов (оптимальных условий образования качественных антифрикционных покрытий), с учетом применения трех различных конструкционных материалов по разработанной технологии нанесения композиционных антифрикционных покрытий на шейки коленчатого вала (приближенное значение $\sigma_m = 200 \dots 250$ МПа), подтверждает выдвинутые нами теоретические предположения:

$$T = (213 / 225) = 0,95 \approx 1. \quad (2.9)$$

Следует учесть, что применяемые конструкционные материалы покрытия (натирающих инструментов) естественно будут испытывать различную степень деформации – латунь в меньшей степени, медь и баббит в большей, их пределы прочности, а также предел текучести материала подложки могут также существенно отклоняться от указанных значений.

Экспериментальная отработка режимов нанесения композиционных антифрикционных покрытий с использованием специального приспособления (имеющего возможность регулирования давления натирающего инструмента) для ФАБО деталей типа «вал» (рис. 2.1-2.2.) позволила подтвердить результаты данных теоретических расчетов также и в части необходимого контурного давления в зоне нанесения покрытия ($P_c = 7$ МПа), которое согласуется с имеющимися литературными данными $P = 5 \dots 10$ МПа [15].

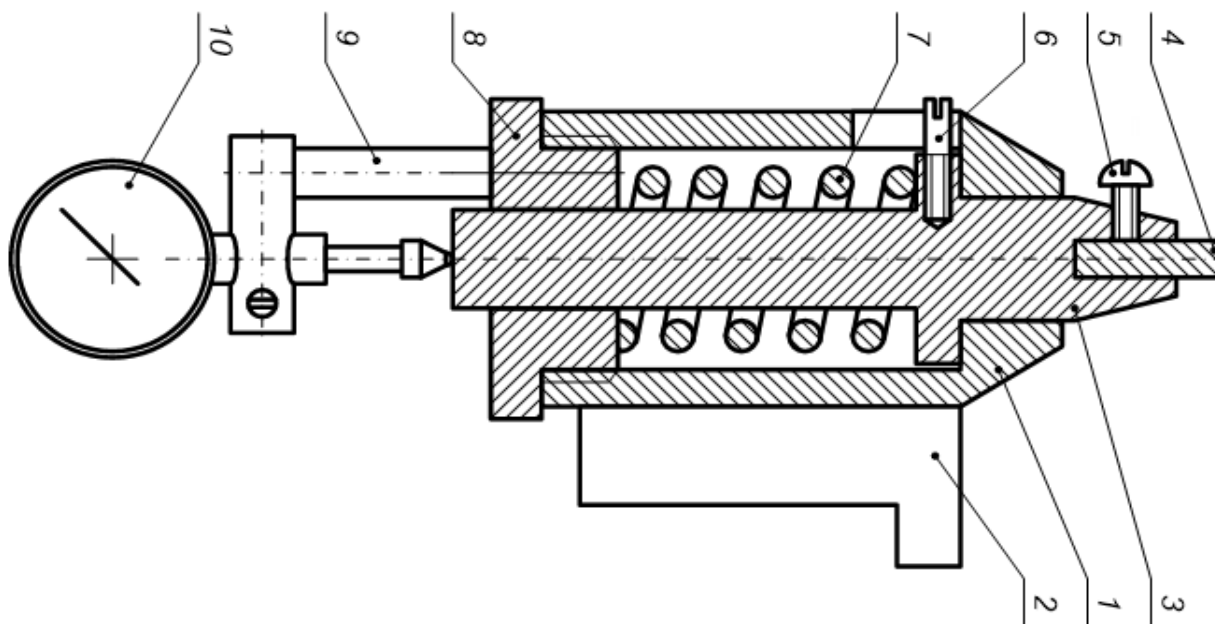


Рисунок 2.1 – Схема устройства для нанесения антифрикционных покрытий
 1 – корпус устройства; 2 – площадка для крепления устройства; 3 – плунжер;
 4 – алюминиевый пруток; 5 – винт, закрепляющий пруток; 6 – фиксатор; 7 - спиральная пружина; 8 – резьбовая пробка; 9 – кронштейн для крепления индикаторной головки; 10 – индикаторная головка

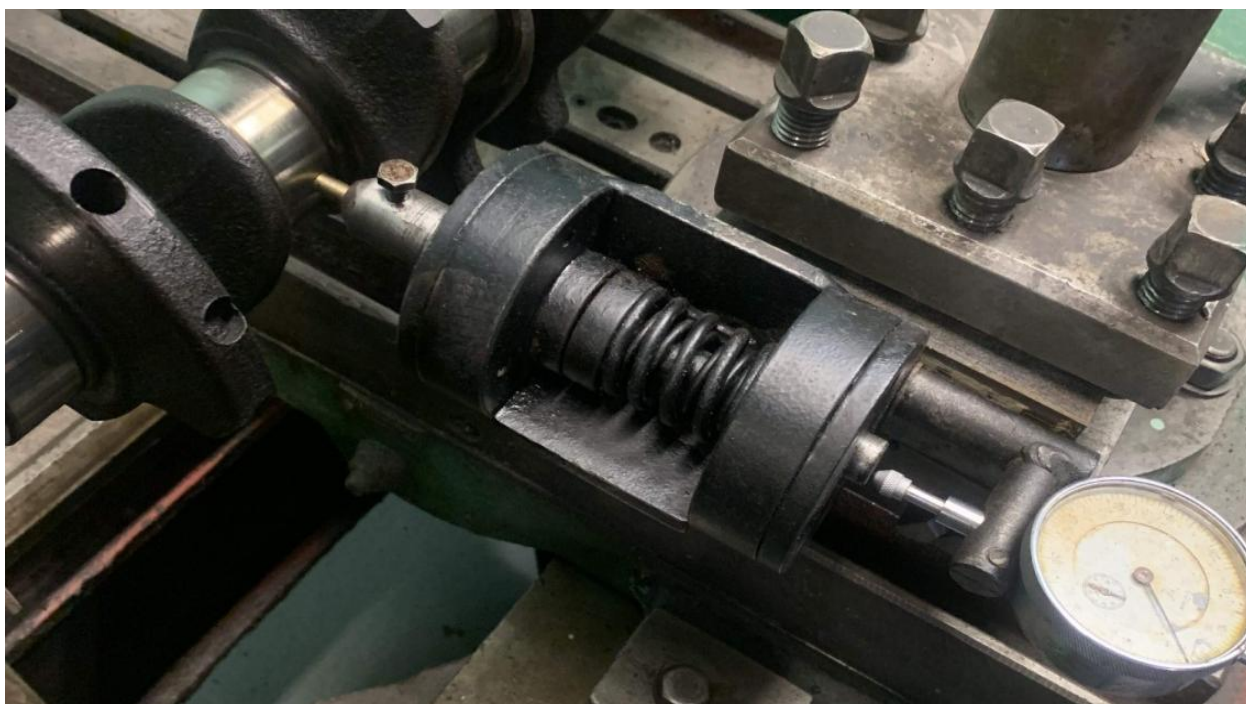


Рисунок 2.2 – Отработка технологии нанесения антифрикционных покрытий

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 (рис. 2.3 - 2.4).

Для тарировки была сконструирована и изготовлена специальная установка, включающая в себя Г-образную станину, на вертикальной стойке которой закреплены слесарные тиски. На горизонтальной полке станины установлена ось вращения двуплечего рычага, на одном плече которого размещена упорная пята, а на другом плече – подвеска с грузами (рис. 2.5).

Процесс тарировки выполнялся в следующем порядке. Натиральное устройство закреплялось в тисках таким образом, чтобы его стержень касался пяты, расположенной на одном из плеч рычага. Путем поворота наружного ободка круговой шкалы индикаторной головки отсчетная стрелка совмещалась с нулевой отметкой. Далее на подвеску устанавливались грузы различной массы, которые создавали на рычаге вращающий момент, уравновешиваемый силой упругости пружины натирающего устройства. По значениям силы сжатия пружины и соответствующим перемещениям штока, отображаемым показаниями индикаторной головки, построен тарировочный график (рис. 2.6).

Производственная отработка режимов нанесения композиционных антифрикционных покрытий с использованием специального устройства (рис. 2.1-рис.2.2), (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 $P = 10...20$ МПа [17-18, 43].

В дальнейшем все покрытия наносили при следующих режимах нанесения: скорость нанесения 0,25 м/с, при количестве проходов $i = 4$.



Рисунок 2.3 – Эталонный образец покрытия



Рисунок 2.4 – Внешний вид композиционных антифрикционных покрытий (x 25)

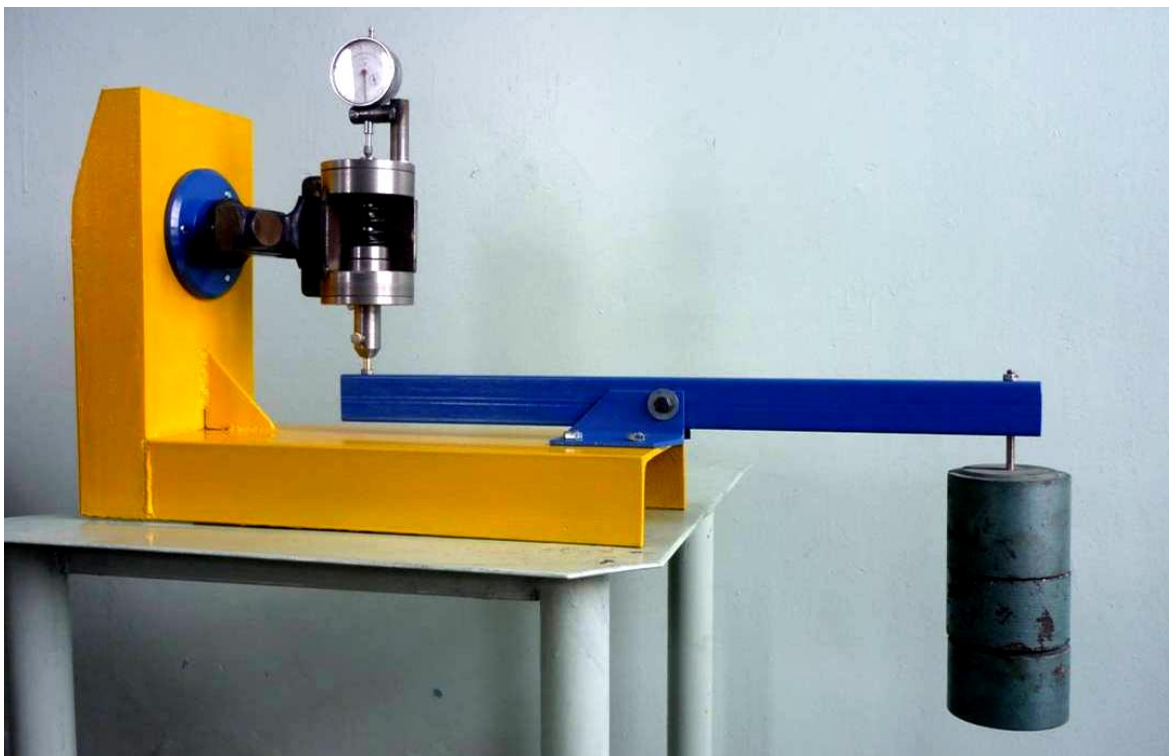


Рисунок 2.5 – Общий вид установки для тарировки силы прижатия натирающего инструмента

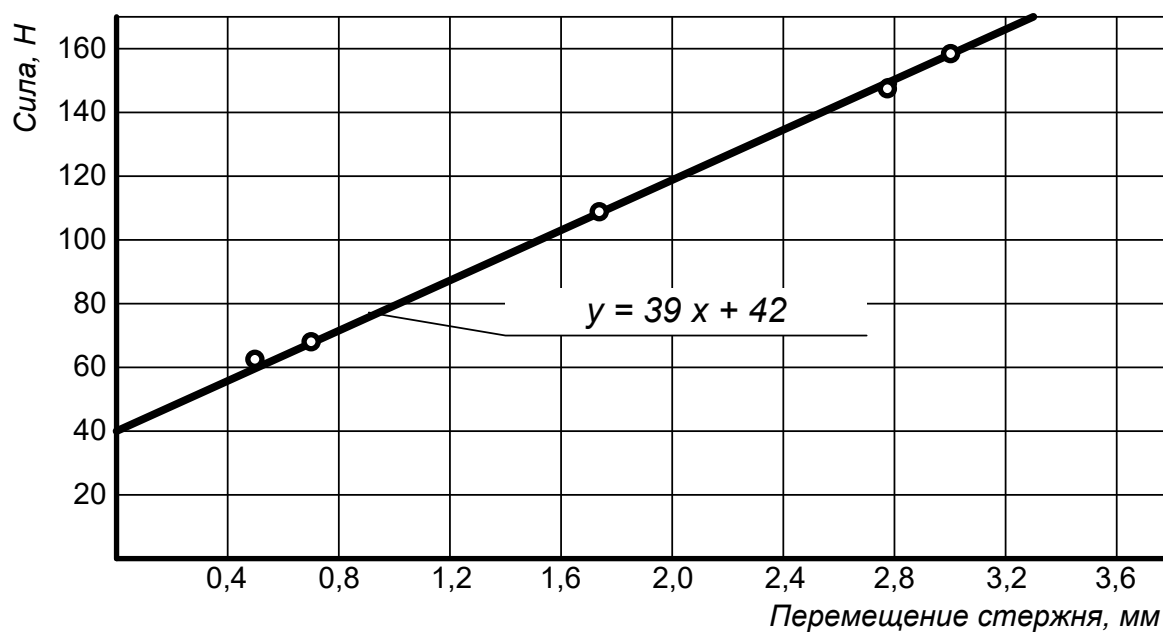


Рисунок 2.6 – Тарировочный график для определения силы прижатия устройства

После построения линии тарировки стало возможным вывести формулу зависимости силы упругости пружины (y) от перемещения штока натирающего устройства (x). Выполнив математические преобразования, было получено следующее выражение

2.4. Выводы по главе 2.

1. На основании анализа теоретических аспектов нанесения антифрикционных покрытий методом ФАБО, установлено, что повышение износостойкости нанесенных покрытий может быть обеспечено за счет активизации четырех факторов (каналов) нанесения: химического, механического, вакансионно–дислокационного и термического (разработки новых технологических сред, оптимизации режимов нанесения и применения новых материалов для натирающих инструментов).

2. Для активизации химического канала нанесения разработана новая алюминийсодержащая технологическая жидкость (Патент на изобретение RU № 2821971), включающая соли меди, никеля, олова и алюминия, а также глюкозу, глицерин и воду. Введение солей алюминия обеспечило повышение антифрикционных и противоизносных характеристик получаемых покрытий.

3. Определены оптимальные соотношения компонентов, обеспечивающие эффективное восстановление металлов, нужную вязкость и стабильность состава, что позволило использовать его в циркуляционных системах СОТС без дополнительных мер по защите.

4. Фрикционно-механический метод с применением нового состава активизирует процесс нанесения покрытия не только химически, но также за счёт механического и термического воздействия, обеспечивая формирование композиционного покрытия, обогащённого алюминием и оловом.

5. Для дальнейшего повышения износостойкости и задиростойкости получаемых покрытий (активизации механического, вакансионно–дислокационного и

термических каналов) за счет изменения других составляющих технологии нанесения (применяемых материалов, устройств и режимов) разработан новый способ нанесения антифрикционных, противоизносных покрытий на шейки коленчатого вала.

6. На основании теоретических исследований предложена математическая зависимость для определения необходимого контурного давления для фрикционного нанесения качественных композиционных покрытий методом фрикционного алитирования (формула 2.7].

7. Проверочный расчет необходимого контурного давления по предложенной формуле, а также приближенный расчет коэффициента степени деформации контактирующих материалов (оптимальных условий образования качественных антифрикционных покрытий), с учетом применения алюминия по разработанной технологии подтверждает выдвинутые в диссертации теоретические предположения.

3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Планирование исследовательских работ

В диссертации применен комплексный метод проведения исследований, состоящий из комплекса аналитических, теоретических и экспериментальных исследований (рис. 3.1) и состоящий из:

- лабораторных трибологических испытаний на триботехническом исследовательском комплексе (машине трения) Timken-Mashine при создании технологических сред и отработке технологии нанесения фрикционных покрытий [38-39, 61, 83];

- сравнительные лабораторные триботехнические испытания предлагаемой технологии фрикционного алитирования [38-39, 61, 83].;

- физико-химические исследования по определению наклепа подповерхностных слоев, химического состава материала покрытия и переходной зоны, изучению поверхностей трения [16, 61, 70, 83, 102-103, 108, 110].

Работа выполнялась в несколько этапов. На первом этапе изучали фактический уровень надежности коленчатых валов ДВС СХТ, анализировали факторы, влияющие на их безотказность и долговечность, оценивали эффективность применяемых технологических процессов и материалов при их ремонте.

На следующем этапе, на основании последних достижений в области триботехники, проведены теоретико-экспериментальные исследования в целях совершенствования технологии нанесения антифрикционных покрытий методом ФАБО для повышения износостойкости, а, следовательно, и надежности коленчатых валов ДВС СХТ.

Теоретические исследования определили область дальнейших экспериментальных и опытно-конструкторских работ по созданию новых технологических решений в данной области.

Выбор и испытания технологической жидкости проводились на основе ре-

зультатов литературно–патентного анализа. Определялись тенденции в создании технологических жидкостей путем выявления влияния различных компонентов па процесс нанесения и получаемые свойства пластичных покрытий. Сравнительные триботехнические испытания разработанной и базовой технологических сред проводились в режиме приработки.

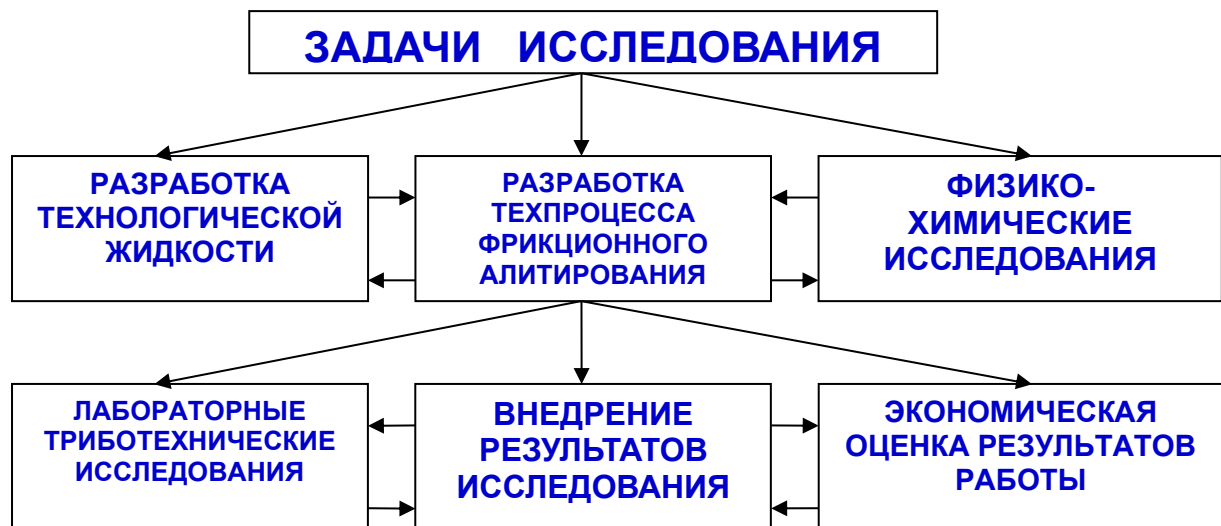


Рисунок 3.1 – Планирование исследовательских работ

Сравнительные испытания проводились с использованием конструкционных и смазочных материалов соединения «шейка коленчатого вала – вкладыш» двигателя СМД–62. В качестве базы сравнения взяты типовая технология восстановления коленчатых валов путем шлифования шеек под ремонтный размер, принятая на Волоколамском АРЗ, Ростокинском РЗ, ООО «АгроУспех» и большинстве других предприятиях отрасли, а также технология нанесения на шейки коленчатого вала латунных покрытий в присутствии технологической среды СФП–3, разработанная д.т.н.. профессором В.И. Балабановым в МГАУ им. В.П. Горячкина [13].

Физико-химические исследования нанесенных покрытий заключались в оценке влияние разработанной технологии на повышение микротвердости обработанных образцов на приборе ПМТ-3М и в изучении химического состава нанесенного покрытия и переходной зоны), которые проводилось на установке

ЭГ-5 (ОИЯИ, г. Дубна 360, а также осуществлялись изучение и фотографирование поверхностей после нанесения антифрикционных покрытий [38-39, 61, 83].

1. Износ трущегося соединения (I , мг). За период испытаний в результате трения наблюдается потеря массы трущихся деталей с изменением зазоров в соединениях. Интенсивность изнашивания в процессе испытания снижается, а затем стабилизируется на определенном значении в зависимости от конкретных скоростных и нагрузочных режимов. Приработочный износ относительно высокий поэтому его определяют по показателю уменьшения массы деталей посредством взвешивания [2, 7, 20, 38-39, 83, 112].

2. Коэффициент трения (f).

3. Температура образцов в зоне трения (T °C). Температура трущихся поверхностей образцов в процессе трения вначале повышается, а затем стабилизируется за счет применения смазочного материала и оптимизации микрогеометрии поверхности [2, 7, 20, 38-39, 83, 112].

Указанные показатели работы соединения «шейка коленчатого вала – вкладыш» приняты в данной диссертации за основные, так как достаточно полно описывают работоспособность коленчатых валов ДВС АТТ. В работе подробно рассматриваются физические и химические процессы и явления, оказывающие влияние на эксплуатационные параметры пар трения. Данные исследования позволяют охарактеризовать технологический процесс в целях достижения повышения качества всей системы и состоят из следующих исследований:

- лабораторные триботехнические исследования;
- физико-химические исследования поверхностей трения;
- производственная апробация результатов исследования.

Режимы лабораторных трибологических испытаний на машине трения устанавливались в соответствии с реальными условиями эксплуатации трущегося соединения шейка коленвала – вкладыш АТТ и составляли: удельное давление в зоне трения $p = 10$ МПа, скорость скольжения нижнего дискового образца $v = 6,4$ м/с, смазочный материал подавался в зону трения - окунанием, продолжительность одного испытания $t = 60$ мин [2, 7, 20, 38-39, 83, 112].

Температура в зоне трения определялась специальным термоэлектрическим датчиком по ГОСТ 6616-74.

Производственная апробация проводилась в целях проверки результатов лабораторных триботехнических испытаний на реальных объектах, в реальных условиях эксплуатации, а также подготовки рекомендаций для внедрения технологического процесса на конкретном ремонтном предприятии.

3.2. Оборудование и аппаратура для лабораторных исследований

Лабораторные триботехнические исследования осуществлялись на машине трения марки Timken-Machine. Принцип работы машины трения Timken-Machine основан на реализации вращательного движения по схеме «кольцо – палец» и трения пальчикового образца 2 по кольцевому образцу 1. Общий вид машины трения Timken-Machine представлен на рисунке 3.2, схема установки на рисунке 3.3, а отдельные узлы на рисунках 3.4 и 3.5.

Установка состоит из станины 7; электродвигателя со шкивом и с ременной передачей 6; кюветы для смазочного материала 5; нижнего кольцевого образца 4; верхнего пальчикового образца с термодатчиком 3; нагрузочного механизма 2, грузов 1; аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и персонального компьютера (PC) с установленным на нем специальным программного обеспечения.

Момент сил трения регистрируется датчиком момента ДМ. Сигналы от последнего и термопары ДТ передаются на контрольно-регистрационный блок машины трения (рисунок 3.7), состоящий из АЦП марки Testo 177-T3 Logger (ФРГ) и персонального компьютера, где непрерывно записываются и хранятся в памяти. Нагрузка задается при помощи рычага 9. Регистрация момента сил трения осуществляется с помощью специального устройства, позволяющего избежать отказа машины при перегрузках в моменты отдельных пусков и остановов двигателя установки 9.



Рисунок 3.3 – Общий вид машины трения Timken-Machine

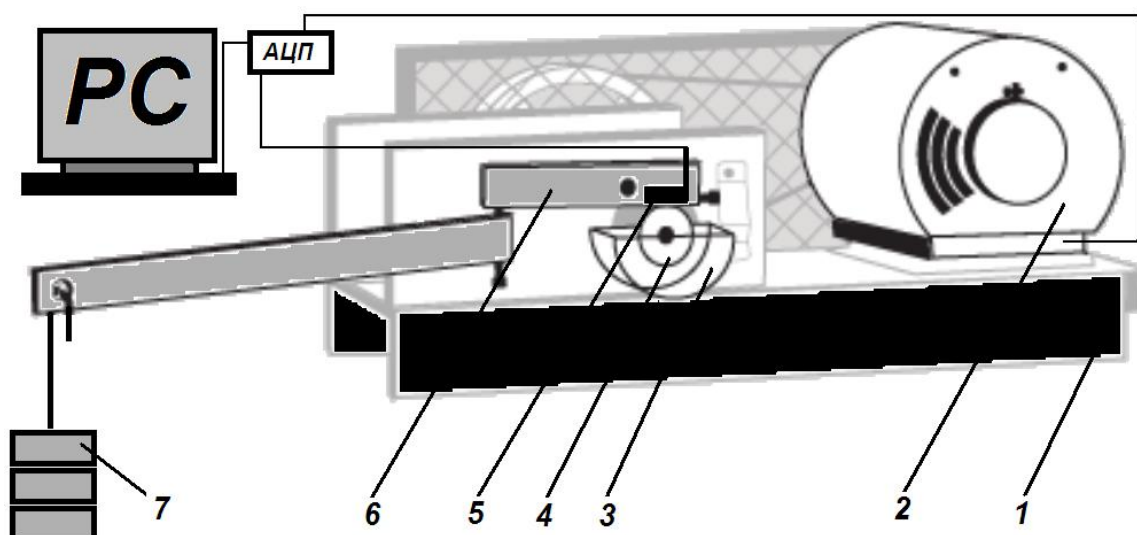


Рисунок 3.4 – Схема машины трения Timken-Machine

1 – станина; 2 – электродвигатель; 3 – кювета для смазочного материала;
 4 – нижний кольцевой образец с покрытием; 5 – верхний пальчиковый образец
 с термодатчиком; 6 – нагрузочный механизм; 7 – грузы; АЦП – аналого-циф-
 ровой преобразователь; *PC* – персональный компьютер

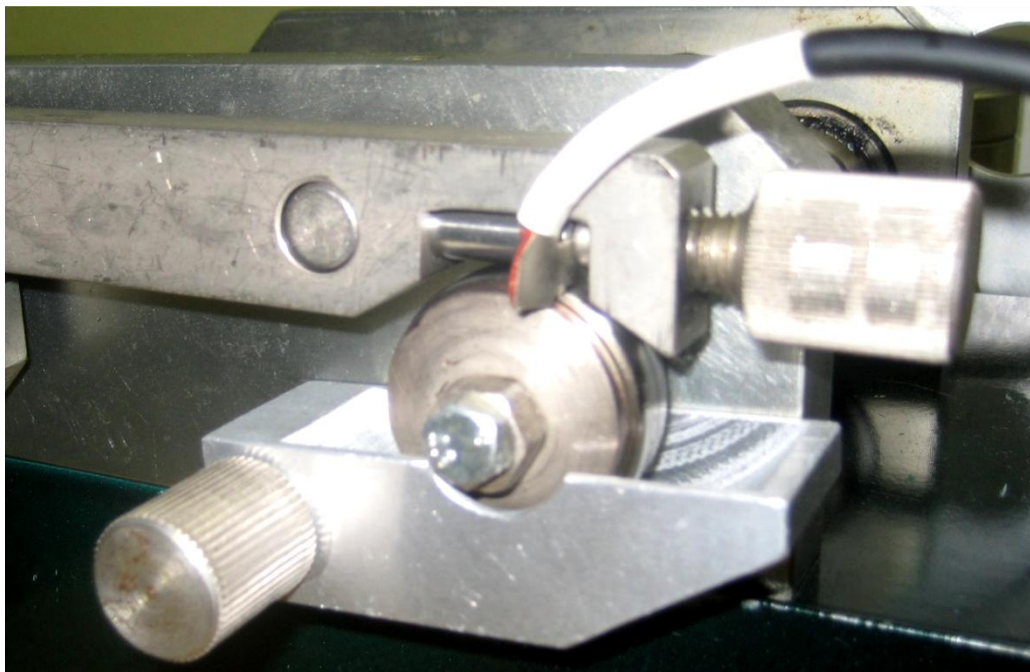


Рисунок 3.5 – Узел трения Timken-Machine с установленным термодатчиком

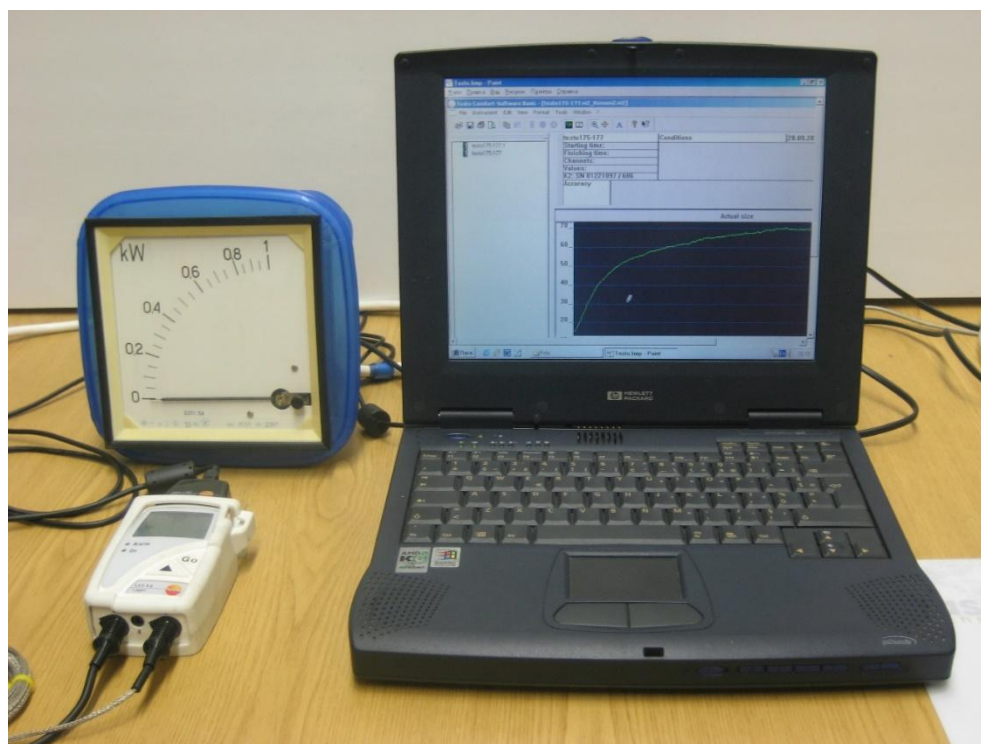
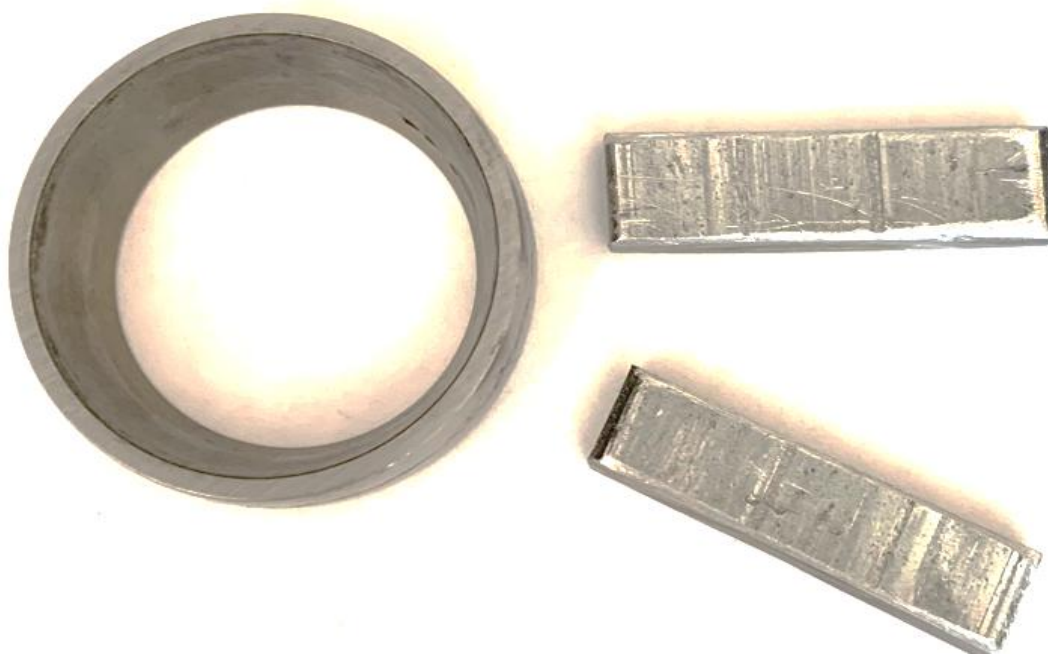


Рисунок 3.6 – Контрольно-регистрационный блок машины трения Timken-Machine

Общие виды и эскизы образцов приведены на рисунках 3.7 и 3.8.



а)

б)

Рисунок 3.7 – Общий вид образцов для испытаний на машине трения Timken-Machine: а – нижний кольцевой, б – верхний пальчиковый

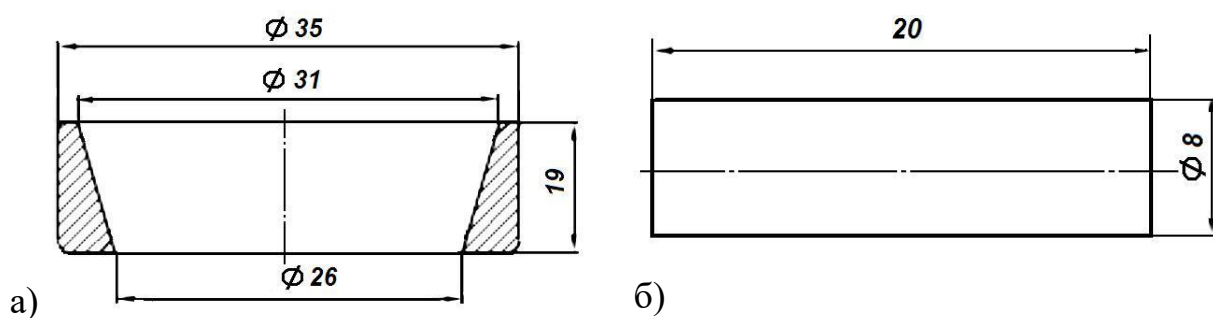


Рисунок 3.8 – Эскизы образцов к машине трения Timken-Machine:

а – нижний кольцевой образец, б – верхний пальчиковый образец

Износ образцов оценивали в конце испытаний весовым методом на аналитических весах марки WA-21 (Производства «Mechaniki zakłady precyzyjnej», Польша) с точностью измерений до 0,0001 г. (рис. 3.10).



Рисунок 3.9 – Весы лабораторные аналитические ВЛА-200

На рис. 3.10 представлен общий вид образцов для физико-химических исследований с покрытиями, нанесенными методом фрикционного алитирования.



Рис. 3.10 – Специальные образцы с фрикционным медноалюминиевым покрытием

Для морфологического исследования использовали сканирующий электронный микроскоп LEO-1430 VP (Carl Zeiss, Германия) в режиме высокого вакуума с ускоряющим напряжением 20 кВ и четырёх квадрантным детектором обратно рассеянных электронов (4QBSD). Образцы фиксировали на электропроводящий скотч и напыляли платиной ($\sim 10 \dots 15$ нм) в течение 130 с в аргоновой атмосфере (0,1...0,2 мбар) для предотвращения зарядки. Рабочее расстояние варьировали от 14 до 30 мм, что позволяло исследовать рельеф с увеличением от $100\times$ до $4010\times$, охватывая как макрзоны контакта, так и субмикронные структуры. Высокий атомный контраст между Cu и Al обеспечивал чёткую визуализацию границ зёрен, трещин и фазовых включений без травления [16, 60, 110].

Фрактальный анализ проводили по микрофотографиям с применением Python (библиотеки OpenCV, scikit-image). Изображения конвертировали в градации серого, сглаживали фильтром Гаусса ($\sigma = 1$), выделяли дефекты методом Кэнни (пороги 30/100), замыкали разрывы морфологической операцией и бинаризовали. Фрактальную размерность D_f определяли методом равномерных сеток: на бинарное изображение накладывали сетку с размером ячейки $\varepsilon = 2 \dots 128$ пикселей (в геометрической прогрессии), подсчитывали число занятых ячеек $N(\varepsilon)$ и строили зависимость $\ln N(\varepsilon)$ от $\ln(1/\varepsilon)$. Наклон линейной регрессии (коэффициент детерминации $R^2 > 0,98$) давал значение $D_f = 1,917 \pm 0,076$, подтверждая самоподобие трещин в диапазоне масштабов 10...300 мкм. Анизотропию оценивали через преобразование Хафа: параметр порядка $S = 0,513$ указывал на умеренную направленность трещин, обусловленную направлением фрикционного воздействия. Плотность дефектов достигала 45,7% [16, 60, 110].

Исследования элементного состава образцов методом Резерфордского обратного рассеяния (ROR) проводилось на установке ЭГ-5 (ОИЯИ, г. Дубна, РФ). 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

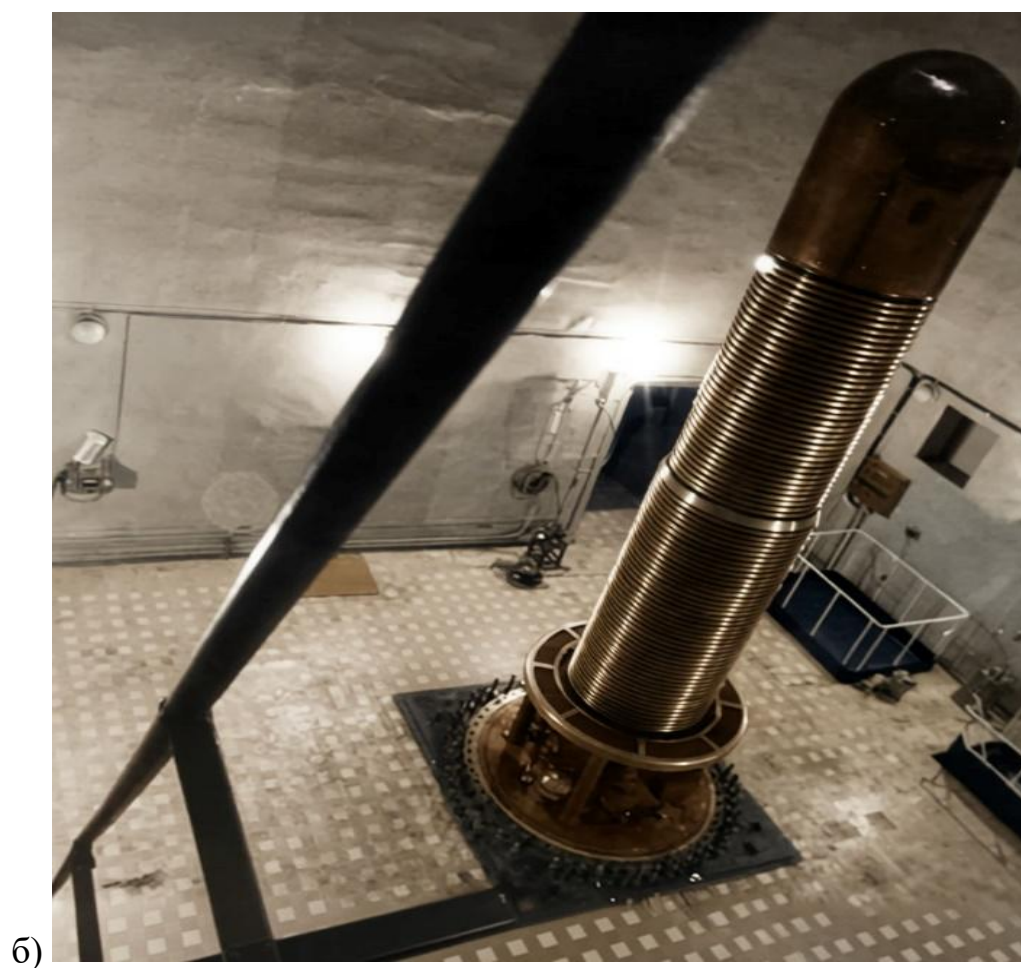
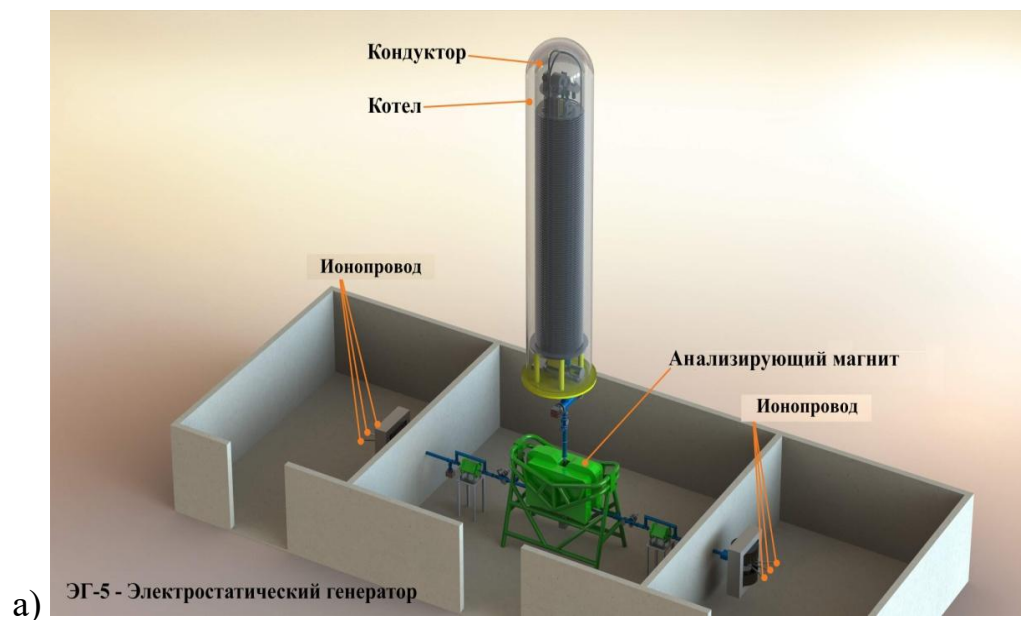


Рис. 3.11 – Установка ЭГ-5 (ОИЯИ, г. Дубна)

а) схема электростатического генератора)

б) общий вид камеры анализа с индукторной катушкой

по глубине пленок в исследуемых образцах проводилась с применением программы моделирования SIMNRA. Сплошными красными линиями на полученных графиках показаны результаты моделирования экспериментальных данных при помощи программы SIMNRA, которые позволяют провести оценку концентрации различных элементов послойно по всей толщине образца [16, 60, 110].

Химический состав и глубинные профили алюминия (Al), меди (Cu) и кислорода (O) определяли методом спектрометрии резерфордовского обратного рассеяния (RBS) на ускорительной установке ЭГ-5 в лаборатории Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ). Ионы $^4\text{He}^+$ ускоряли до 2,0 МэВ, регистрировали рассеянные частицы полупроводниковым детектором (угол 165° , разрешение 16 кэВ) при вакууме 0,67 мПа. Моделирование спектров осуществляли в программе SIMNRA 6.03 с учётом различия масс ядер Cu и Al, что обеспечивало чёткое разделение пиков и позволяло количественно оценить толщину слоёв (0,5...5,0 мкм), градиенты концентрации и степень взаимной диффузии на границе «покрытие–подложка» с погрешностью $\leq \pm 3\%$ (плотность потока $5 \cdot 10^{12}$ ионов/(с·см²), экспозиция 300 с) [16, 60, 110].

3.3. Проведение лабораторных трибологических испытаний

Перед началом испытаний уточнялись режимы испытания на машине трения Timken-Mashine, а именно продолжительность испытаний.

Для испытаний использовались пальчиковые образцы для машины трения Timken-Mashine изготавливались из алюминиевого антифрикционного сплава АО-20-1 (ГОСТ 14113-78), а дисковые образцы из стали 45 (ГОСТ 1050-2013) (рисунок 3.8) – без каких либо покрытий. В качестве смазочного материала применялось моторное масло М-10-Г2 (ГОСТ 8581–78), используемое в автотракторной технике.

Времена испытаний τ (с) определяли по стабилизации коэффициента трения μ , температуре в зоне трения T (°C) и интенсивности изнашивания пальчиковых образцов I (г) при трении в чистом моторном масле М-8-В. Испытания

проводили при удельной нагрузке $p_a = 10$ МПа, относительной скорости скольжения $v = 6,4$ м/с и назначенной подаче смазочного материала $Q = 0,085$ мл/с.

Установлено, что при данных режимах испытания и применяемых конструкционных и смазочных материалах стабилизация этих параметров наступает после продолжительности испытаний в течение $\tau = 3600$ с, что соответствует с ранее полученными экспериментальными значениями [8, 11, 53].

Износ образцов оценивали в конце испытаний весовым методом на аналитических весах марки ВЛА-200 с точностью $0,0001$ г. [8, 11, 53].

До взвешивания дисковый и пальчиковые образцы в течение 10 мин выдерживали в сушильном шкафу при температуре около 70°C .

За реальный износ за время испытаний принимали средние арифметические значения трех опытов [8, 11, 53].

Температуру поверхностей трения определяли температуру смазочного состава с помощью искусственной «хромель-копель» термопары (ГОСТ 66174), которую монтировали полихлорвиниловой трубке. Термопару подключали к потенциометру КСП-4. Перед испытаниями проводили тарировку термопары. Для этого емкость со смазочной композицией устанавливали на электрическую плиту, в испытуемый состав опускали термопару присоединенную к потенциометру. Температуру разогреваемого состава фиксировали термометром с пределами измерений от 0 до 200°C и одновременно делали соответствующие отметки на шкале потенциометра через каждые 15 градусов [8, 11, 53].

Момент силы трения при лабораторных испытаниях регистрировался и записывался на установке Timken-Mashine с помощью потенциометра КСП-4 с точностью до $0,1$ мВ, который был предварительно протарирован. После тарировки прибора устанавливали образцы и включали установку. Потенциометр обеспечивал запись изменения момента силы трения на бумагу. За время испытаний пар трения (120 мин.) момент силы трения уменьшался. Испытания покрытий проводили на постоянной нагрузке 10 МПа, линейной скорости скольжения $6,4$ м/с и капельной смазке смазочными композициями в объеме $0,085$ мл/с.

Нагрузочный и скоростной режим для всех испытаний устанавливался в

соответствии с условиями в испытываемых соединениях. Так, для соединения «шейка – вкладыш» автотракторного двигателя режимы устанавливались: нагрузка $p = 10$ МПа, скорость скольжения $v = 6,4$ м/с [8, 11, 53].

Сравнительные лабораторные триботехнические исследования также проходили в режиме приработки.

1. Партии испытательных образцов, изготовленные по единой технологии с размерами и параметрами шероховатости в пределах установленных допусков, подвергали контрольному анализу. Определяли их твердость, микротвердость отдельных фаз, микротвердость поверхностных слоев на глубину не менее 0,03 мм. К испытаниям допускались партии образцов с материаловедческими различиями не более 10 %. Результаты контрольного анализа заносили в протокол испытаний.

2. Образцы промывали бензином по ГОСТ 2084–77 и высушивали в сушильном шкафу при температуре 50 °С в течение $\tau = 900$ с, после чего образцы взвешивали на аналитических весах ВЛА-200 (рисунок 3.10) с точностью до 0,0001 г. Результаты взвешиваний заносились в протокол испытаний.

3. В зажим пальчикового образца плотно устанавливали термоэлектрический преобразователь по ГОСТ 6616–74 диаметром 0,5 мм. Испытательную установку прогревали на холостом ходу не менее $\tau = 3600$ с.

4. Устанавливали образцы в держатели машины трения. Нагрузку p (МПа) рассчитывали по формуле

$$p = A_a \cdot p_a, \quad (3.1)$$

где A_a – площадь номинальной поверхности трения неподвижного образца, м²; p_a – расчетное номинальное давление, применительно к которому оценивается необходимый параметр, МПа.

5. Назначали режим смазывания, исходя из экспериментальных данных.

6. Проводили пуск установки, в процессе работы которой непрерывно записывали значения температуры образцов и силы (момента) трения. Повторность испытаний соответствовала ГОСТ 11.004–74 и составляла 3.

7. Образцы снимали с установки, тщательно промывали в бензине по

ГОСТ 2084–77 и просушивались в сушильном шкафу при температуре 50 °С в течение $\tau = 900$ с.

8. Образцы вновь взвешивали на аналитических весах АДВ-200 с точностью до 0,0001 г. Результаты взвешиваний заносили в протокол испытаний.

$$\Delta I = I_1 - I_2, \quad (3.2)$$

где ΔI – износ образцов за период испытания, г; I_1, I_2 – масса образца до и после испытаний, г.

9. Определяли среднее значение момента трения по записи на ленте потенциометра по формуле:

$$M_{\text{тр}} = l_m \cdot K_m, \quad (3.3)$$

где l_m – показатели прибора на ленте; K_m – чувствительность прибора.

10. Определяли среднюю температуру в зоне трения по записи на ленте регистрирующего прибора по формуле

$$T = I_m K_m. \quad (3.4)$$

Отчет показаний прибора вели от линии, соединяющей значения момента трения и температуры до испытаний и после испытаний.

11. По результатам испытаний строили линейные зависимости, для чего брали среднее значение параметров по всей группе опытов. Результаты испытаний приведены в главе 4.

Пальчиковые образцы из алюминиевого антифрикционного сплава АО-20-1 ГОСТ 2337–86 до испытаний прирабатывались на стальных образцах без покрытия до площади приработки не менее 90 %.

Испытания в режиме приработки проводились по методике, изложенной в п. 3.2. при следующих режимах: $p = 10$ МПа, $v = 6,4$ м/с, $\tau = 3600$ с, $Q = 0,085$ мл/с. При этом образцы перед испытанием дополнительно не прирабатывались.

В качестве смазочного материала применялось моторное масло М-8-В ГОСТ 8581–78, используемое при обкатке и эксплуатации бензиновых и дизельных двигателей.

При этом образцы перед испытанием дополнительно не прорабатывались.

В качестве СМ применялось моторное масло М–10–Г2к ГОСТ 8581–78, используемое при обкатке и эксплуатации дизельного двигателя СМД–62.

Обработка результатов испытаний проводилась в соответствии с требованиями математической статистики. Результаты проведенных испытаний представлены в главе 4.

3.4. Проведение физико-химических исследований

Как уже отмечалось ранее, в результате ФАБО рядом исследователей отмечается изменение механических свойств подложки, выражающееся в повышении микротвердости подповерхностных слоев обработанных деталей [11, 92, 94].

В целях подтверждения и уточнения этих данных в работе проведен замер микротвердости поверхностей с покрытиями, нанесенными по разработанной технологии.

Оценивалось влияние технологии на повышение микротвердости обработанных образцов, а также осуществлялось изучение и фотографирование поверхностей трения после сравнительных триботехнических испытаний технологии [[16, 60, 110].

Микротвёрдость – твердость, определяемая при нагрузках до 4,9 Н характеризующая сопротивление пластическому и упругому деформированию отдельных структурных составляющих, частиц, микрообъемов материала [11, 92, 94].

Рассматривается метод по восстановленному отпечатку, заключающийся во внедрении за определенное время в предварительно подготовленную поверхность алмазного наконечника, снятия статической нагрузки, измерения геометрических параметров полученного отпечатка и определения по ним чисел микротвердости [11, 92, 94].

Для испытаний использовались небольшие изделия, (исследовательские микрошлифы, специально изготовленные образцы-свидетели), вырезанные из

испытательных образцов. Шероховатость локального участка, на который будет наноситься отпечаток, не должна быть хуже $Ra = 0,32$ мкм по ГОСТ 2789-73. Шлифы изготавливаются так же, как для металлографических исследований. При изготовлении шлифов необходимо принимать меры, исключая возможные изменение микротвёрдости (устранить наклёп и нагрев). Испытуемая поверхность должна быть сухой, без следов загрязнения. Для обеспечения необходимого расположения осей приложения нагрузки, индентора и покрытия, а также для устранения смещений, прогиба и поворота шлифа, последний рекомендуется устанавливать на предметном столике с использованием пластилина, в который образец предварительно вдавлируется лабораторным ручным процессом [11, 92, 94].

В общем случае могут использоваться несколько различных по форме и размерам алмазных наконечников: параметры заострения и форма отпечатков алмазных наконечников. В наших испытаниях использовался наконечник в виде четырёхгранной пирамиды с квадратным основанием (пирамида Виккерса).

Наконечник с формой трёхгранной пирамиды рекомендуется для испытаний заведомо твёрдых материалов ($HV > 1000$). Это обусловлено тем, что несмотря на равновеликость боковой поверхности и высоты четырёхгранной пирамиды, трёхгранная имеет более совершенное заострение. Слой малой толщины и низкой твёрдости можно испытывать используя наконечник с формой рабочей части в виде четырёхгранной пирамиды с ромбическим основанием. Бицилиндрический наконечник применяется для испытаний на микротвёрдость весьма тонких (менее 3 мкм) покрытий и плёнок [11, 92, 94].

Нами, как уже отмечалось, использовался прибор ПМТ-3 (рис. 3.12), устройство и работа, на котором рассматривается ниже [11, 92, 94].

Относительная погрешность измеряемых линейных параметров не более 5 %. Верхний предел измеряемой микротвёрдости ограничен до 7000 HV. Для нагружения используются специально изготовленные гири массой 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 г (нагрузки 0,049, 0,098, 0,196, 0,490, 0,981, 1,962, 4,905 Н).

В комплект микротвердомеров всех типов входят трёх- и четырёх-гранные (Виккерса) пирамиды. Боковые поверхности пирамиды должны быть гладкими, не иметь трещин и других дефектов. Рабочую поверхность индентора следует периодически проверять осмотром на микроскопе при 100-кратном увеличении или косвенно по форме отпечатка [11, 92, 94].



Рисунок 3.12 – Прибор ПМТ-3М для измерения микротвердости поверхностей

Для определения значений микротвёрдости принимается их среднее значение. Разность длин диагоналей одного и того же отпечатка не должна превышать 5 % от меньшего значения. Для высоко пористых, неоднородных материалов критерий искажения формы (соотношения диагоналей отпечатка) может быть увеличен [11, 92, 94].

Числа микротвёрдости для четырёхгранной алмазной пирамиды с квадратным основанием (Нμ, МПа) определяется по среднему арифметическому длин обеих диагоналей с помощью таблиц ГОСТ 9453-76, либо по формуле

$$H\mu = F/A = 0,18544 (F/d^2) 10^{-6} \quad (3.5)$$

где F – нормальная нагрузка, приложенная к нормальному наконечнику, Н; A – условная площадь боковой поверхности полученного отпечатка, мм²; d – среднее арифметическое длин обеих диагоналей квадратного отпечатка, мм.

Результаты исследований во всех случаях заносились в специальный журнал испытаний и обрабатывались с использованием правил статистического анализа. Повторность лабораторных испытаний (измерений) соответствовала ГОСТ 11.004–74 и равнялась – 5.

После всех испытаний вычисляются следующие характеристики: среднее арифметическое результатов испытаний ($\bar{X}$); среднее квадратичное отклонение результатов испытаний (S); коэффициент вариации результатов испытания (V); границы доверительного интервала, в котором с вероятностью P заключено искоемое значение показателя X ; относительное отклонение (β). Используются следующие формулы [1]:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n X_i / n ; \quad (3.6)$$

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / n - 1} ; \quad (3.7)$$

$$V = 100 S / \bar{X}; \quad \varepsilon = t S / \sqrt{n}; \quad \beta = 100\varepsilon / \bar{X}, \quad (3.8)$$

где X_i – относительное значение определяемого показателя; n – количество образцов (испытаний); ε – величина, равная половине доверительного интервала; t – критерий точности, квантиль распределения Стьюдента, определяемой по таблице (для пяти измерений при доверительной вероятности $P = 0,90$ квантиль распределения Стьюдента $t = 2,132$).

3.5. Выводы по главе 3.

1. Разработана и апробирована методика проведения исследований, учитывающая конструкционные особенности и условия работы шеек коленчатых валов автотракторной техники.

2. Для окончательной оценки свойств разработанной технологии при ремонте коленчатых валов ДВС следует провести производственную апробацию и внедрение в реальных условиях эксплуатации, применительно к конкретным условиям предприятия.

4. Результаты статистической обработки опытных данных показывают, что для лабораторных триботехнических испытаний и физико-химических исследований ошибки экспериментов находятся в интервале 1,5 ...4,7 % при значении доверительной вероятности равной 0,9.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Результаты лабораторных триботехнических испытаний

В процессе сравнительных лабораторных триботехнических испытаний состава для антифрикционных покрытий типа СФП–3 и разработанной с участием автора содержащая алюминий технологическая жидкость (Патент на изобретение RU № 2821971), установлено, что фрикционные покрытия, нанесенные на дисковый образец с использованием технологического состава для фрикционно–механического нанесения покрытий СФП–3, снижает износ конструктивных материалов соединения «шейка коленчатого вала – вкладыш» в среднем на два раза. Покрытия, полученные с применением содержащей алюминий технологической жидкости (Патент на изобретение RU № 2821971) по сравнению с покрытиями, полученными с применением технологического состава СФП–3 не более чем на 5 % (рис. 4.1).

Полученные результаты триботехнических испытаний, выявившие возможность не значительного повышения износостойкости нанесенных покрытий с применением содержащей алюминий технологической жидкости (Патент на изобретение RU № 2821971) показали, что возможность дальнейшего улучшения качества антифрикционных покрытий за счет оптимизации технологических сред (активации химического канала нанесения) практически исчерпано.

Как уже отмечалось, на основании данных результатов было принято решения в целях дальнейшего повышения износостойкости и получаемых покрытий о разработке мероприятий по изменению других составляющих технологии нанесения: применяемых материалов, устройств и режимов, то есть активации механического, вакансионно–дислокационного и термических каналов [.

На основании результатов лабораторных триботехнических испытаний содержащая алюминий технологическая жидкость (Патент на изобретение RU №

2821971) выбрана в качестве технологической среды для нанесения антифрикционных покрытий при разработке технологического процесса «ФАБО шеек коленчатых валов» и проведения дальнейших лабораторных исследований и производственного использования.

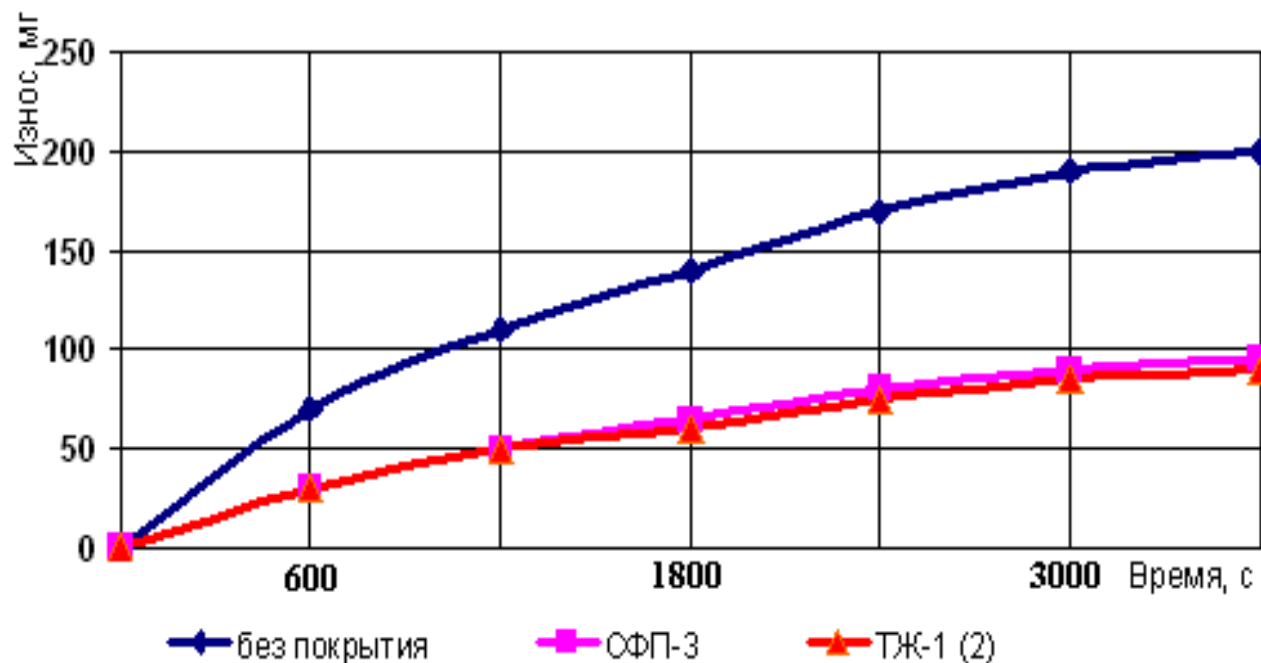


Рисунок 4.1 – Результаты сравнительных триботехнических испытаний технологических сред

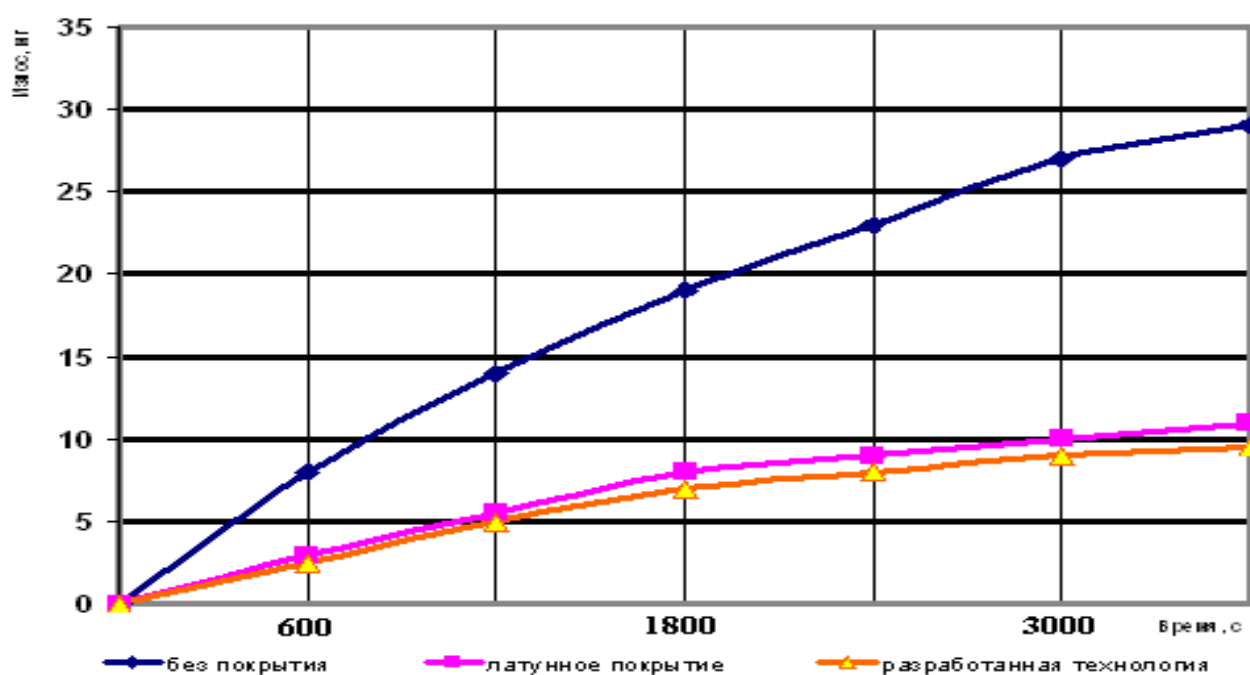


Рисунок 4.2 – Снижение износа образцов при применении разработанной технологии фрикционного алитирования

Лабораторные триботехнические испытания в режиме приработки показывают, что применение разработанной технологии, заключающееся в нанесении композиционных противоизносных покрытий в содержащей алюминий технологической жидкости (Патент на изобретение RU № 2821971), по сравнению с базовым вариантом восстановления (шлифование под ремонтный размер) и латунными покрытиями, полученными в среде СФП–3, обеспечивает следующие положительные результаты:

1. Нанесение антифрикционных противоизносных покрытий позволяет существенно (более чем в 3 раза) снизить интенсивность изнашивания конструкционных материалов соединения «шейка коленчатого вала – вкладыш» в период приработки (рис. 4.2).

2. Нанесение композиционных противоизносных покрытий позволяет воздействовать кроме химических каналов активации поверхности, также механический, термический и вакансионно–дислокационный каналы и обеспечить снижение интенсивности изнашивания по сравнению с известными технологиями нанесения антифрикционных покрытий на шейки коленчатого вала в среднем на 8,2... 10 % (рис. 4.2).

3. Момент трения у образцов с нанесенными антифрикционными противоизносными покрытиями в первый момент времени несколько превышает значения момента трения у образцов без покрытия. Это можно объяснить тем, что в этот период идет интенсивная приработка нанесенных покрытий с формированием оптимальной структуры поверхностных слоев. В дальнейшем наблюдается повышение антифрикционных свойств у всех образцов. При этом момент трения на 9,4 % ниже у образцов с покрытиями (рис. 4.3). Момент трения у образцов с многослойными покрытиями, полученные по разработанной технологии имеет тенденции к дальнейшему снижению (см. рис. 4.3).

4. Температура в зоне трения при испытании образцов с антифрикционными покрытиями может быть снижена почти в пять раз, что может быть связано с лучшей теплопроводностью нанесенных покрытий и отсутствием очагов

схватывания, так называемых мгновенных температурных всплеск на микро-контактах [17, 44, 59, 93, 117].

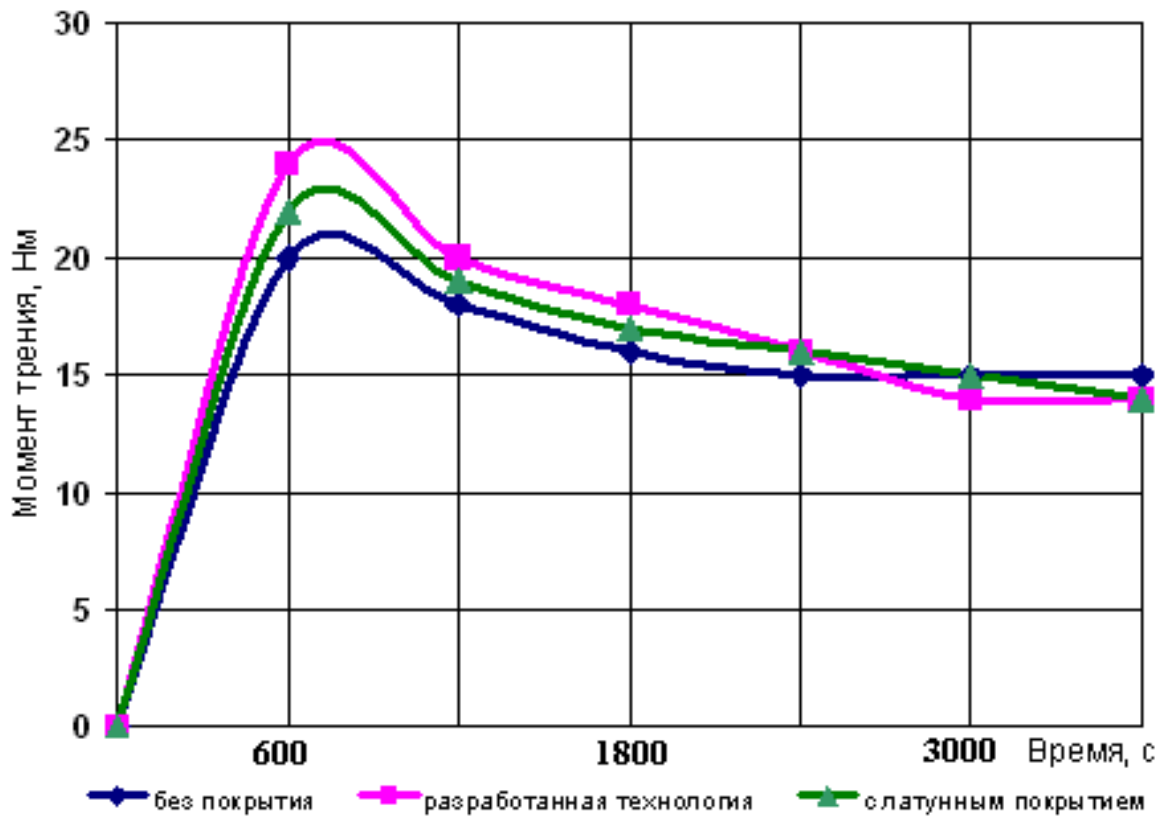


Рисунок 4.3 – Влияние разработанной технологии на момент трения

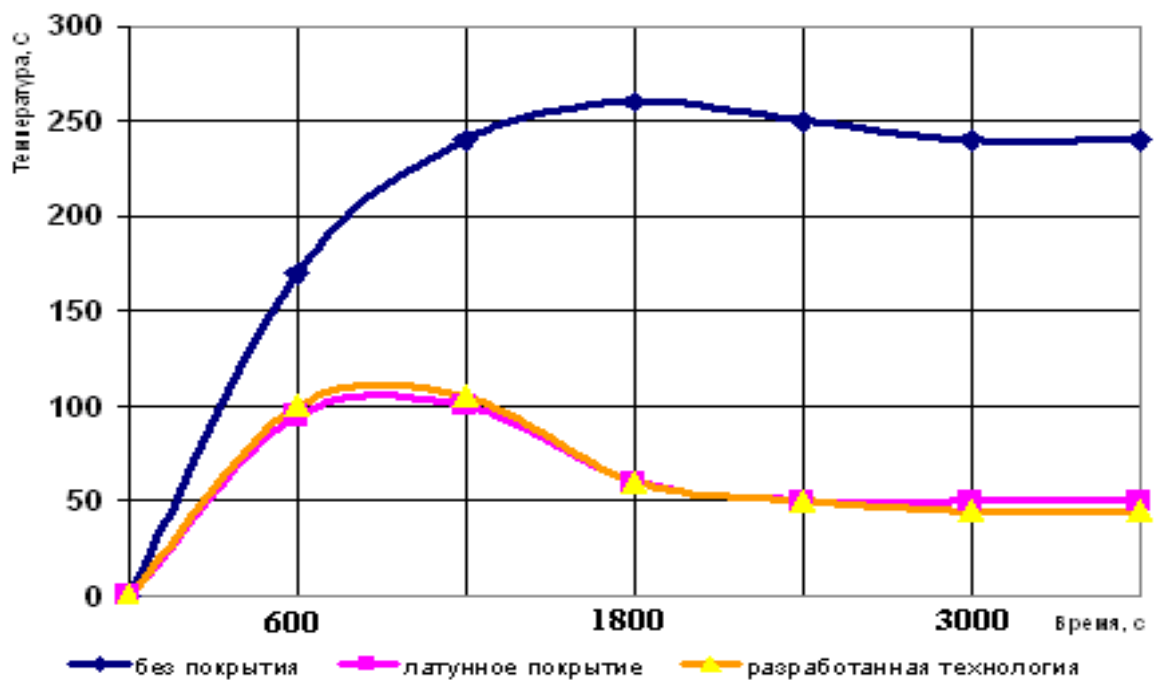


Рисунок 4.4 – Влияние разработанной технологии на снижение температуры образцов в зоне трения

4.2. Результаты физико-химических исследований композиционных антифрикционных покрытий

Исследования изменения микротвердости конструкционной стали 45 ГОСТ 1050–2013 с базовой микротвердостью $HV\ 280$ ($H\mu = 2800$ МПа) после фрикционного алитирования по разработанной технологии позволили установить, что обработанные поверхности приобретают наклеп до $HV\ 375$ ($H\mu = 3750$ МПа). При этом зона наклепа поверхностных слоев образцов с покрытием наблюдается на глубине $h = 15...35$ мкм, чем обеспечивается положительный градиент механических свойств основы (рис. 4.5). Полученные данные достаточно полно согласуются с результатами, полученными ранее д.т.н., профессором Г. Польцером (ФРГ) и д.т.н., профессором В.И. Балабановым (МГАУ) [11, 90, 131-132].

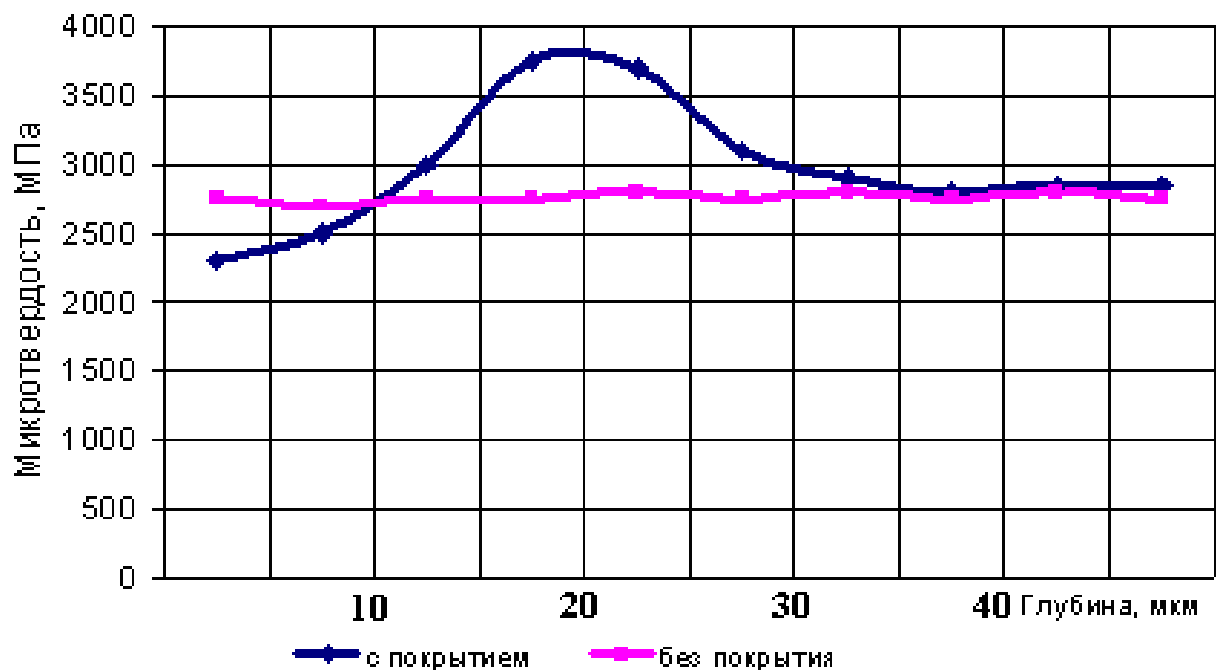


Рисунок 4.5 – Микротвердость ($H\mu$, МПа) стальных образцов в зависимости от глубины замера (h , мкм)

Некоторое снижение абсолютных величин микротвердости на 6,25 % может быть вызвано применением нами более пластичных материалов с низшей поверхностной твердостью и пределом прочности, что в свою очередь позволяет

получать более равномерные и более износостойкие покрытия.

В целом исследование микротвердости поверхностей трения указывает на возможность существенного повышения механических свойств деталей, обработанных методом ФАБО.

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 [16, 60, 110].

Алюминий равномерно распределен по всей глубине образцов (~13 ат.%), что подтверждает его роль как легирующего элемента, обеспечивающего стабильность и повышенную износостойкость структуры [16, 60, 110].

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 [16, 60, 110].

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 [16, 60, 110].

Изучение и фотосъемка поверхностей трения стального диска и пальцев по базовому варианту (без покрытия) после лабораторных исследований на триботехническом комплексе Timken machine выявили процессы схватывания поверхностей трения и возникновения задиров вплоть до переноса алюминиевого антифрикционного сплава на стальную поверхность трения диска [16, 60, 110].

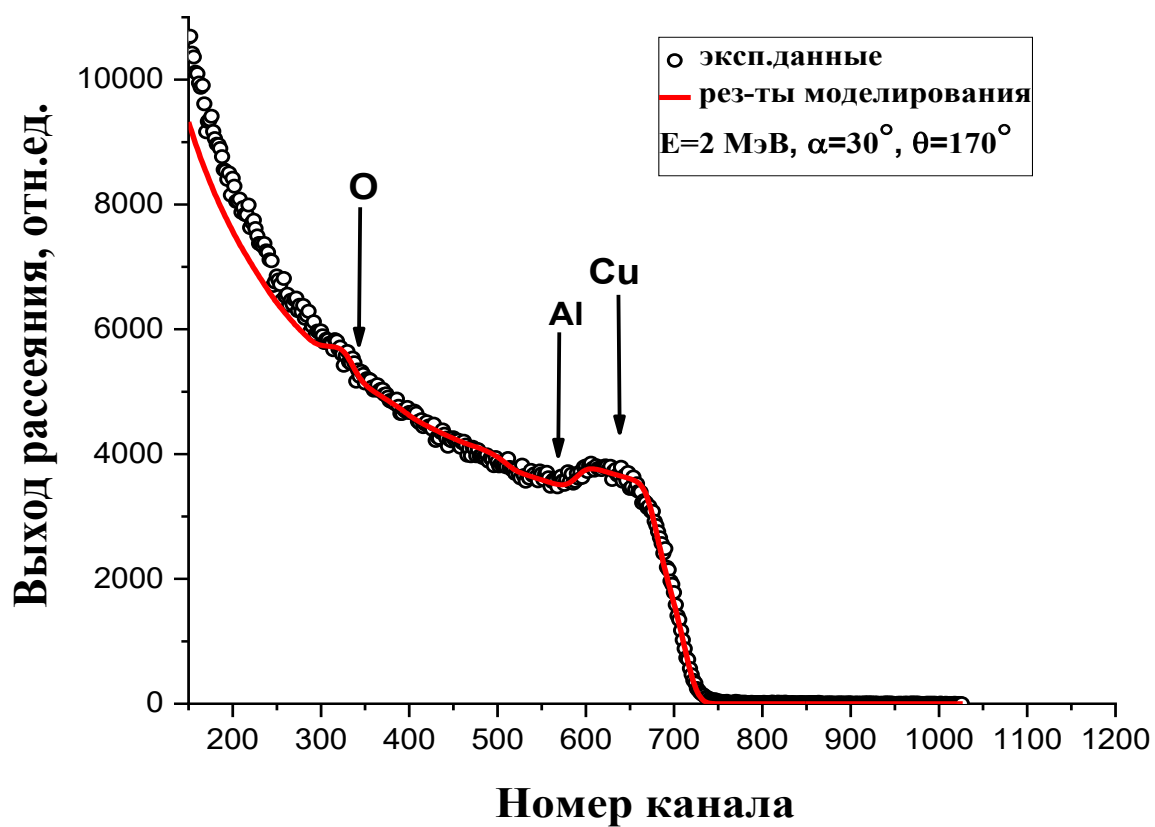


Рисунок 4.6. – Энергетический спектр RBS

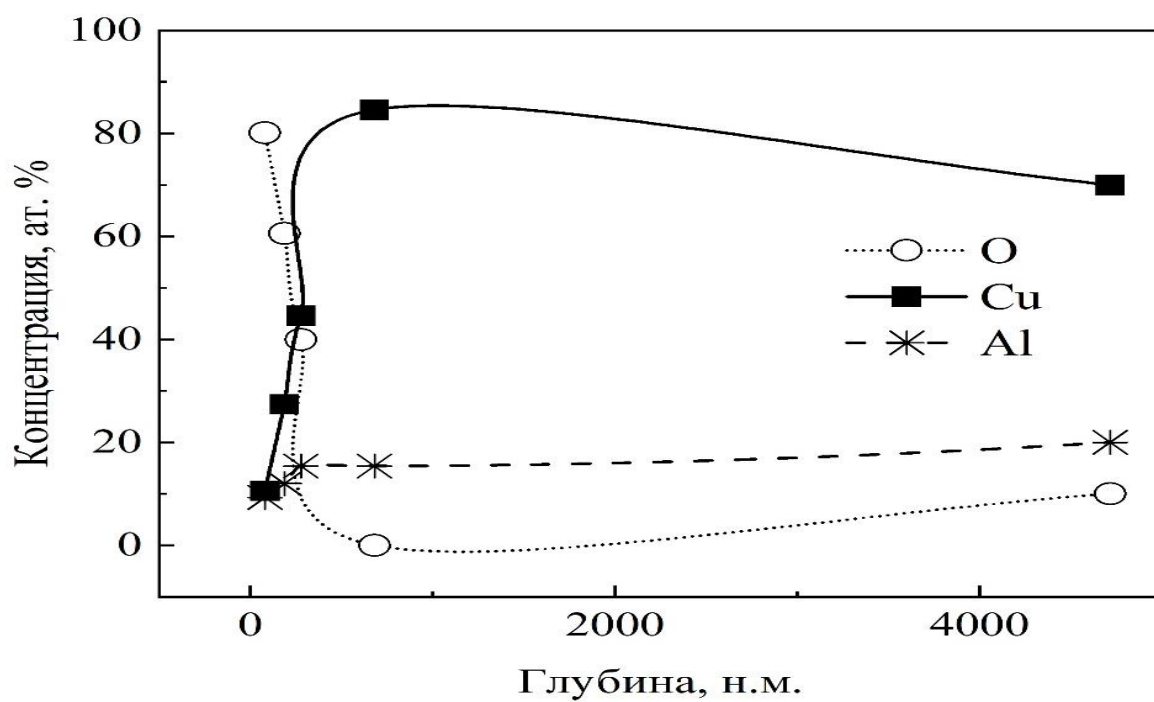


Рисунок 4.7 – Распределение химических элементов по глубине образца

Изучение и фотосъемка поверхностей трения стального диска без покрытия и пальцев по базовому варианту (без покрытия) после триботехнических испытаний на машине трения выявили процессы схватывания поверхностей трения и возникновения задира вплоть до переноса алюминиевого антифрикционного сплава на поверхность трения диска из стали 45 ГОСТ 1050–2013.

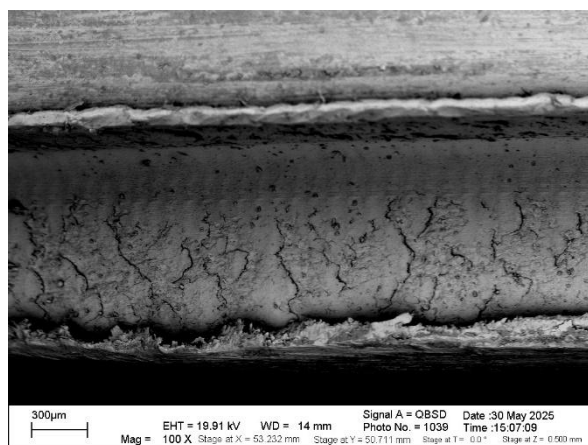
После триботехнических испытаний на машине трения пальцев и дисков с покрытием на фотоснимках поверхностей трения дисков видны характерные участки оголенной поверхности с изношенным антиизносным покрытием. Поверхность трения пальчикового образца при этом имеет более высокое качество поверхности по сравнению с испытаниями в чистом масле без покрытия.

Анализ полученных изображений внешнего вида поверхностей трения, показывает, что нанесение антифрикционных противоизносных покрытий позволяет перенести разрушительные процессы схватывания и последующего разрушения поверхностей трения с резким повышением интенсивности изнашивания в зону пластичной легко деформированной пленки нанесенного покрытия без протекания усталостных процессов и накопления дефектов поверхности (роста количества дислокаций) (рис. 4.8). [16, 60, 110].

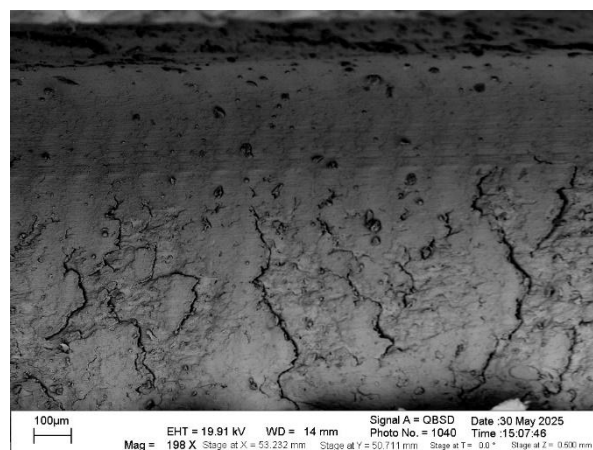
Наиболее эффективно применение композиционных антифрикционных покрытий, из материалов с различными усилиями сдвига, пластичностью, пределами текучести и прочности.

Результаты физико-химических исследований однозначно указывают, что повышение износостойкости обработанных поверхностей обеспечивается за счет нанесения композиционных антифрикционных покрытий по разработанной технологии, включающей наличие следующих положительных факторов, часть из которых показана схематично на рис. 4.9:

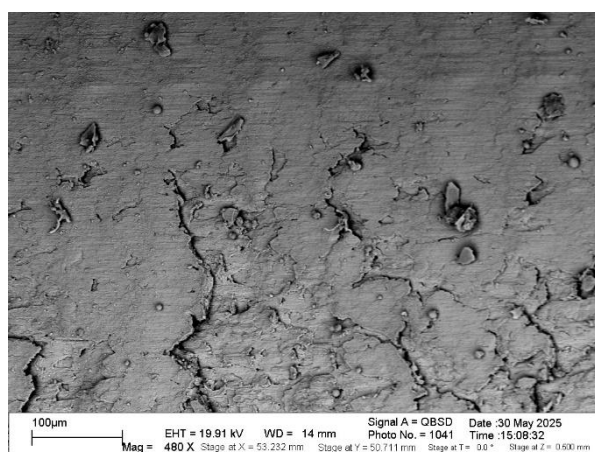
- твердосмазочное антифрикционное и противозадирное покрытие, толщиной $h = 1 \dots 3$ мкм, на поверхности детали;



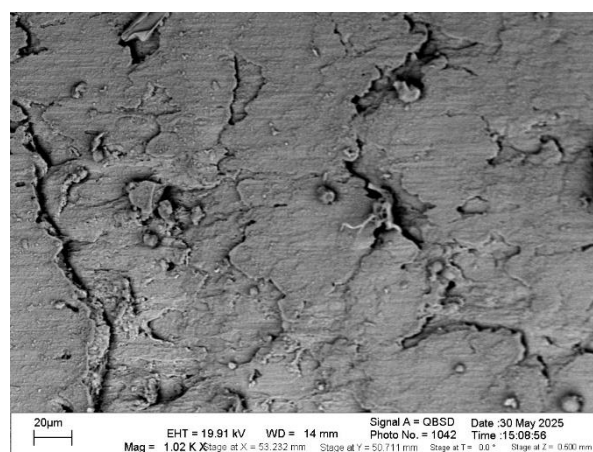
(a)



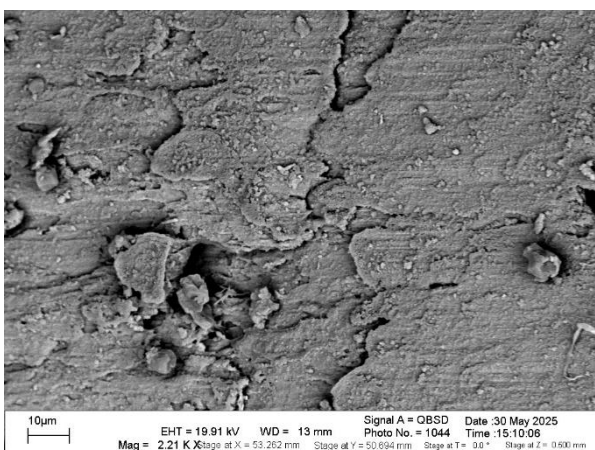
(б)



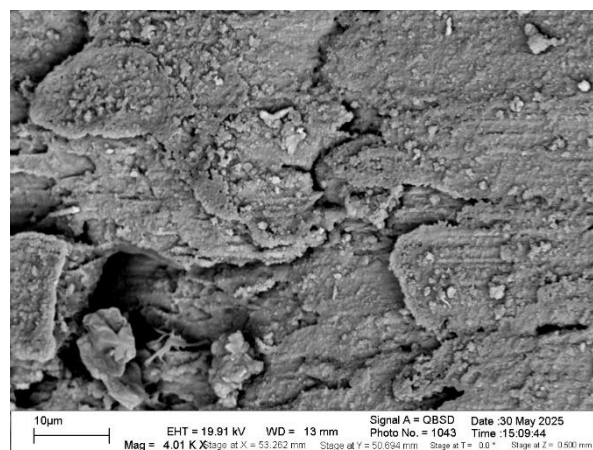
(в)



(г)



(д)



(е)

Рисунок 4.8 – СЭМ-изображения микроструктуры медно-алюминиевых покрытий, полученных фрикционным алитированием. Поперечные срезы покрытий: а) увеличение $\times 100$; б) увеличение $\times 198$; в) увеличение $\times 480$; г) увеличение $\times 1020$; д) увеличение $\times 2210$; е) увеличение $\times 4010$ [16, 60, 110].

– переходная диффузионная зона, толщиной до $h = 10$ мкм, с высокими антиизносными свойствами;

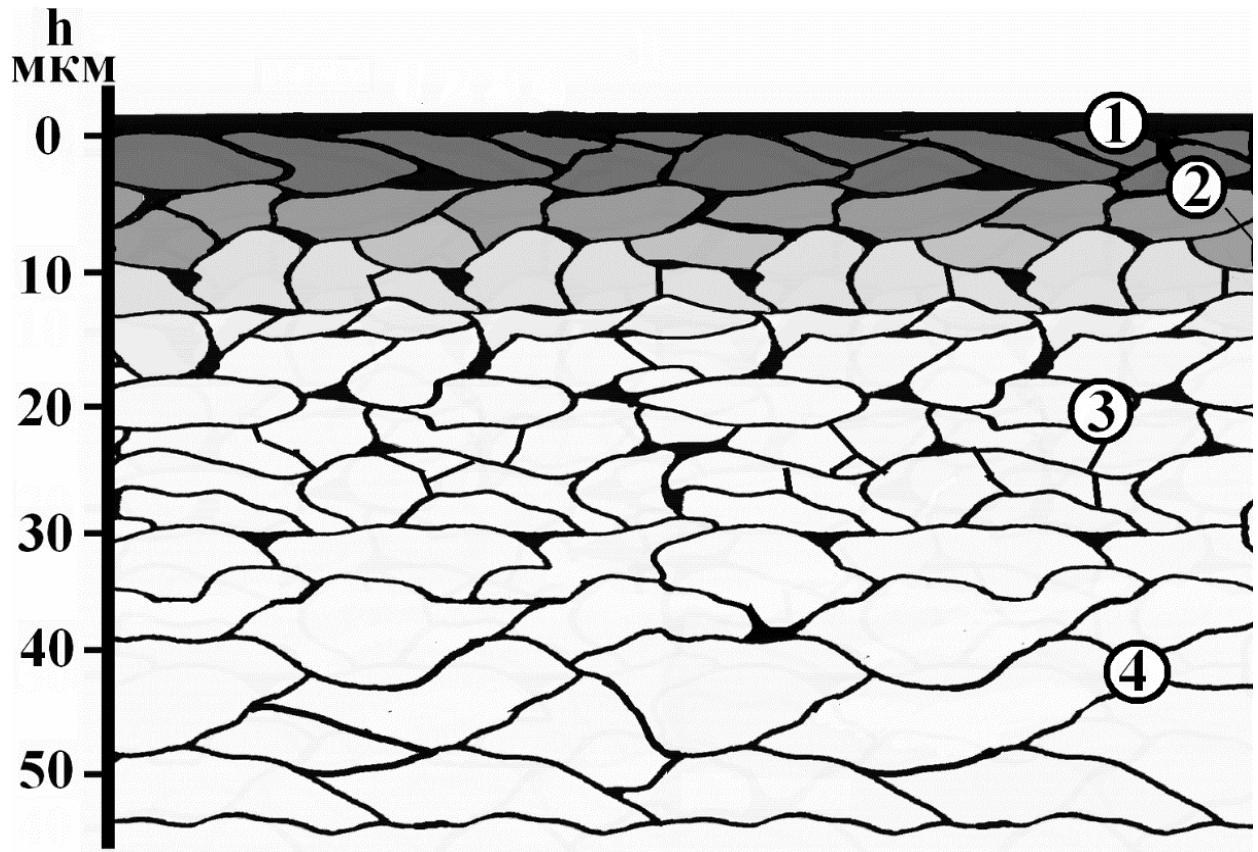


Рисунок 4.9 – Структурная схема поверхностного слоя шейки коленчатого вала после фрикционного алитирования:

- 1 – антифрикционное покрытие (алюминий, медь, кислород);
- 2 – переходная диффузионная зона; 3 – деформированная (наклепанная) зона; 4 – основной конструкционный материал

– наклепанная (деформированная) зона (глубиной до $h = 35$ мкм, по данным Г. Польцера до $h = 70$ мкм, в зависимости от материала подложки [11, 90, 131-132] и твердостью до 400 HB;

– возможность протекания на поверхностях трения процессов по эффекту избирательного переноса при трении Д.Н. Гаркунова, так как имеется медьсодержащее покрытие на поверхности [32-35, 130];

– выглаживание (снижение шероховатости) [11, 90, 131-132] и др.

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). Применение антифрикционных покрытий из композиционных материалов с различными усилиями сдвига, пластичностью, пределами текучести и прочности подложки показывают более высокие триботехнические характеристики [11, 90, 131-132].

4.5. Выводы по главе:

1. Сравнительные лабораторные триботехнические испытания технологических сред для нанесения антифрикционных покрытий позволили установить, что разработанная алюминийсодержащая технологическая жидкость (Патент на изобретение RU № 2821971) позволяют повысить износостойкость образцов не более чем на 5 % по сравнению с лучшими разработками в этой области – технологическими средами марки СФП.

2. Нанесение композиционных противоизносных покрытий позволяет воздействовать кроме химических каналов активации поверхности, также механический, термический и вакансионно–дислокационный каналы и обеспечить снижение интенсивности изнашивания по сравнению с известными технологиями нанесения антифрикционных покрытий на шейки коленчатого вала в среднем на 8,2... 10 %.

3. Для активации химического канала нанесения в диссертации разработана новая 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 алюминийсодержащих композиционных покрытий 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 базовой микротвердостью НВ 280 ($H_{\mu} = 2800$ МПа) после нанесения композиционных антифрикционных покрытий по разработанной технологии позволили установить, что обработанные поверхности получают 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.

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.

5. ВНЕДРЕНИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

5.1. Разработка технологического процесса «ФАБО коренных и шатунных шеек коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания»

По результатам научных и опытно-конструкторских исследований в диссертации разработан новый технологический процесс нанесения антифрикционных покрытий на коренные и шатунные шейки коленчатых валов ДВС, применительно к двигателю автотракторной техники.

Технологический процесс «Финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО) шатунных и коренных шеек коленчатых валов двигателя» в общем случае включает в себя следующие основные операции: моечную, натирание, моечную и контрольную [8-10, 14, 19-21].

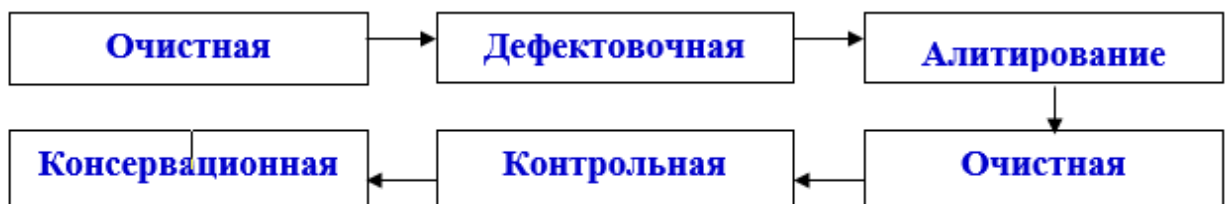


Рисунок 5.1 – Схема технологического процесса фрикционного алитирования детали типа «вал»

Перед нанесением пластичных покрытий трением рекомендуется провести очистку (обезжиривание) поверхностей, предназначенных под обработку, моноэтаноламином ТУ 6–02–915–79 или уайт–спиритом ГОСТ 3134–78 для удаления возможных остатков масляных смазочно–охлаждающих технологических сред (СОТС) и других загрязнений.

Для нанесения покрытий на шейки коленчатого вала наиболее применимы токарно-винторезные или суперфинишные станки. Обработка может осу-

ществляться различными устройствами для фрикционно–механического нанесения покрытий, имеющими возможность одновременной установки не менее трех натирающих инструментов (см. п. 1.2 и п. 2.3).

В качестве технологической среды применяется содержащая алюминий технологическая жидкость (Патент на изобретение RU № 2821971) [17].

Натирающие инструменты приспособления изготавливаются из конструкционных материалов: В качестве материала натирающего инструмента используется алюминиевый сплав АД-31 ($\sigma_{в2} = 200$ МПа).

После нанесения покрытий на коренные и шатунные шейки коленчатых валов, они направляются на операцию очистки. В целях снижения агрессивности находящихся в воде веществ, рекомендуется очистку проводить 1 % раствором глицерина ГОСТ 6259–75 в воде ГОСТ 2874–82.

Сушку проводят вначале сжатым воздухом ГОСТ 11882–73 при давлении 0,1...0,2 МПа с помощью обдирочного крапа 9693–1108, а затем досушивают на воздухе при температуре окружающей среды не ниже 20 °С.

Контроль покрытий осуществляется на столе контролера ОРГ 1 168–01–080А в следующем порядке:

1. С помощью лупы ЛП–4х ГОСТ 25705–83 проверить внешним осмотром сплошность и цвет покрытия. Сравнить его качество с покрытием на цеховом образце покрытия.

2. С помощью профилометра-профилографа модели 253 ГОСТ 19199–73 или цехового образца шероховатости поверхности $Ra = 0,32$ мкм оценить шероховатость поверхности,

При этом покрытия должны быть золотистого цвета, сплошными и гладкими, без крупных частиц перенесенного материала с шероховатостью поверхности не выше $Ra = 0,32$ мкм.

Разработанный «Комплект документов технологического процесса финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО) шатунных и коренных шеек коленчатых валов двигателя» передается на предприятие при внедрении вместе с другими документами и включает в себя следующее:

– ведомость оснастки	–	049297.42170.000;
– маршрутную карту	–	049297.10170.000;
– операционную карту натирания	–	049297.20170.000;
– операционную карту очистки	–	049297.60101.000;
– операционную карту дефектовки	–	049297.60102.000.

5.2. Аprobация и внедрение результатов исследования

Основные положения диссертационной работы представлены, обсуждены и одобрены:

- на научно-технических заседаниях ФГБНУ «Росинформагротех» в 2021-2026 гг;
- кафедры сельскохозяйственного строительства РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева с 2021 по 2026 год;
- Международной научно-практической конференции «Развитие научно-инновационного потенциала аграрного производства» (Тверь, 2022 г.) [19];
- 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.) [20];
- XV Международной научно-практической конференции «Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК» (п. Правдинский, 2024 г.) [21];
- Международной научно-практической конференции «Современные проблемы энергоэффективности агроинженерных исследований в условиях цифровой трансформации» (Балашиха, 2025 г.) [43];

- Международной научно-практической конференции «Новые технологии при использовании техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве» (г. Тамбов, 2025 г.) [44].

Внедрение результатов научно–исследовательских и опытно–конструкторских работ внедрены на следующем предприятии отрасли и в учебном процессе.

I. Опытное внедрение разработанной технологии восстановления коленчатых валов осуществлено в ООО «АгроУспех» (г. Ростов-на-Дону).

На основании производственной апробации технологии в конкретных условиях ремонтно-механических мастерских предприятия и результатов эксплуатационных испытаний обработанных коленчатых валов на автомобильном парке предприятия разработчиками технологии передается в ООО «АгроУспех» для дальнейшего опытного внедрения и использования научно-техническая документация по следующему перечню:

1. Комплект документов технологического процесса: «Финишная антифрикционная безабразивная обработка (алитирование) деталей типа вал».

2. Эскизы приспособления для проведения финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО) шеек коленчатых валов.

Автор диссертационной работы обязуется оказывать научную и технологическую помощь при проведении обработки партии коленчатых валов в объеме опытного внедрения.

II. Разработанная технология фрикционного алитирования поверхностей трения деталей различной техники и оборудования, внедрена в учебный процесс Института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева и используются при чтении лекций и проведении практических занятий 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.

Результаты исследований, представленные в монографии «Диагностирование дизельных двигателей мелиоративных и строительных машин» (Н.К. Усманов, И.Ж. Худаев, В.И. Балабанов, Д.В. Добряков, Саратов, Амирит – 2024 г., 80

с.) могут использоваться магистрами и аспирантами кафедры сельскохозяйственного строительства в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах для повышения надежности мелиоративной и строительной техники [114].

5.3. Экономическая эффективность результатов работы

Экономический эффект от результатов исследований по разработке новой технологии шеек восстановления коленчатых валов шлифованием под ремонтный размер коренных и шатунных шеек с нанесением композиционных антифрикционных противоизносных противозадирных покрытий по разработанной технологии фрикционного алитирования произведен непосредственно к условиям ООО «АгроУспех» (г. Ростов-на-Дону) посредством сопоставления экономических показателей базового и разработанного варианта.

Расчет экономического эффекта проведен по методическим рекомендациям [51, 57-58, 72, 125] в ценах на 01.09. 2026 г.

Применительно к отраслям агропромышленного комплекса экономический эффект мероприятия научно-технического прогресса (НТП) целесообразно рассчитывать по условиям использования продукции за расчетный период.

За «расчетный период» принимается промежуток времени, в течение которого будет использоваться внедряемая технология.

Расчетный период принимается равным 6 лет в соответствии со сроком службы оснастки (приспособления) для восстановления коленчатых валов.

Суммарный по годам расчетного периода экономический эффект определяется по формуле 1 [57, 72]:

$$\mathcal{E}_T = P_T - Z_T, \quad (5.1)$$

где $\mathcal{E}_T$ – суммарный экономический эффект (по годам расчетного периода), р.; P_T – стоимостная оценка результатов осуществления мероприятий НТП за рас-

четный период, р.; Z_t – стоимостная оценка затрат на осуществление мероприятий НТП за расчетный период, р.

Стоимостная оценка результатов за расчетный период осуществляется по следующей формуле [61]:

$$P_T = \sum P_t \cdot \alpha_t, \quad (5.2)$$

где P_t – стоимостная оценка результатов в t -м году расчетного периода, р.; t_n – начальный год расчетного периода; t_k – конечный год расчетного периода; α_t – коэффициент приведения к расчетному году (приложение 4.1 [39]).

$$P_t = C_t \cdot N_t, \quad (5.3)$$

где C_t – стоимость ремонта коленчатых валов, руб; N_t – программа восстановления коленчатых валов в t -м году.

Программа восстановления коленчатых валов по базовому и проектируемому вариантам (с учетом повышения производительности обработки коленчатых валов за счет совершенствования процесса) принимается равной 80 штук в год и также неизменной по годам.

Стоимостная оценка затрат на осуществление мероприятий НТП за расчетный рассчитывается по следующей формуле [57, 72]:

$$\mathcal{Z} = \sum Z_t \cdot \alpha_t = \sum_{t=t_n}^{t_k} (I_t + K_t - L_t) \cdot \alpha_t, \quad (5.4)$$

где Z_t – величина годовых затрат, р.; I_t – текущие издержки при производстве (восстановлении) продукции в году t без учета амортизационных отчислений на реновацию, р.; K_t – единовременные затраты при производстве продукции в году t , р.; L_t – остаточная стоимость (ликвидационное сальдо) основных фондов, выбывающих в году t , р.

Коэффициент приведения к расчетному году α_t определяем по формуле:

$$\alpha_t = (1 + E_H)^{t_p - t}, \quad (5.5)$$

где E_H – норматив приведения разновременных затрат и результатов, численно

равный 0,25; t_P – расчетный год; для 2021 года $t_P = 0$; t – число лет, следующих за расчетным годом; для 2022 – $t = 1$; для 2023 – $t = 2$; для 2024 – $t = 3$; для 2025 – $t = 4$; для 2026 – $t = 5$.

Коэффициент приведения равен:

$$\text{для 2021 года} \quad \alpha_t = (1 + E_H)^{t_P - t} = (1 + E_H)^0 = 1;$$

$$\text{для 2022 года} \quad \alpha_t = (1 + 0,25)^{-1} = 1,25^{-1} = 0,8000;$$

$$\text{для 2023 года} \quad \alpha_t = (1 + 0,25)^{-2} = 1,25^{-2} = 0,6400;$$

$$\text{для 2024 года} \quad \alpha_t = (1 + 0,25)^{-3} = 1,25^{-3} = 0,5120;$$

$$\text{для 2025 года} \quad \alpha_t = (1 + 0,25)^{-4} = 1,25^{-4} = 0,4096;$$

$$\text{для 2026 года} \quad \alpha_t = (1 + 0,25)^{-5} = 1,25^{-5} = 0,3277.$$

Значение себестоимости восстановления коленчатого вала определяется по формуле:

$$C_p = 3П + 3Ч + М + О_{рн} + О_{пу}, \quad (5.6)$$

где 3П – заработная плата, р.; 3Ч – затраты на запасные части, р.; 3Ч = 0; М – затраты на материалы, р.; $O_{рн}$ – затраты на работы, выполненные сторонними организациями, р.

При восстановлении автотракторных коленвалов $O_{рн} = 0$;

$O_{пу}$ – затраты на организацию и управлением производством, включая затраты на электричество, коммунальные и другие платежи, р.

Заработная плата на предприятии составляет:

$$3П = 3П_o + 3П_d + Н_{сп}, \quad (5.7)$$

где 3П_о – основная заработная плата, р.; 3П_д – дополнительная заработная плата, р.; Н_{сп} – начисления на заработную плату, социальное страхование, в пенсионный и другие фонды.

Основная заработная плата 3П_о определяется по формуле:

$$3П_o = T \cdot C_{ч_{cp}} \quad (5.8)$$

где Т – трудоемкость восстановления коленчатого вала согласно норм времени,

чел–час.; $T = 9,5$ чел–час; $C_{\text{чср}}$ – средняя часовая тарифная ставка, руб/час;
 $C_{\text{чср}} = 12,5$ р./час;

$$ЗП_o = 9,5 \cdot 12,5 = 118,75 \text{ руб./час}$$

Дополнительная заработная плата:

$$ЗП_d = ЗП_o \cdot K_d / 100 \quad (5.9)$$

где K_d – коэффициент дополнительной платы, для условий ООО «АгроУспех»
 – $K_d = 10$ %.

$$ЗП_d = ЗП_o \cdot K_d / 100 = 118,75 \cdot 10 / 100 = 11,9$$

Фонд оплаты труда (ФОТ) составляет

$$\text{ФОТ} = ЗП_o + ЗП_d = 118,75 + 11,9 = 130,65 \text{ р./шт.}$$

Учитывая страховые взносы работодателей 26 % от ФОТ заработная плата
 будет составлять:

$$ЗП = ЗП_o + ЗП_d + Н_{\text{сп}} = 118,75 + 11,9 + 47 = 177,65 \text{ р./шт.}$$

Затраты на материалы складываются из затрат на технологические среды
 для ФАБО и затраты на материал натирающих инструментов, которые опреде-
 ляем по формуле:

$$M = O_{\text{ж}} \cdot C_{\text{ж}} + M_{\text{и}} \cdot C_{\text{и}} \quad (5.10)$$

где $O_{\text{ж}}$ – объем расходуемой технологической среды, л;

Для обработки одного коленчатого вала расходуется не более 0,1 л (100
 мл) технологической среды.

$C_{\text{ж}}$ – цена алюминийсодержащая технологическая жидкость (Патент на
 изобретение RU № 2821971), р./кг;

По нашим расчетам цена технологической жидкости составляет $C_{\text{ж}} =$
 540 р./л.

$M_{\text{и}}$ – общая масса материала натирающих инструментов, кг;

Для обработки одного коленчатого вала расходуется 0,01 (около 10 грамм)
 материала алюминиевых натирающих инструментов.

$C_{\text{и}}$ – средняя цена материалов натирающих инструментов, р./кг;

Средняя цена на алюминиевые материалы металлы, применяемые для разработанной технологии ФАБО равна около $C_m = 35$ р./кг.

$$M = 0,1 \cdot 540 + 0,01 \cdot 35 = 54,35 \text{ р.}$$

Рассчитываем затраты на ремонтный фонд по формуле:

$$РФ = 0,1 \cdot C_n = 0,1 \cdot 30000 = 300 \text{ р./шт.}$$

ОПУ по данным ООО «АгроУспех» равно 260 % от ЗП.

$$ОПУ = 2,6 \cdot 177,65 = 461,89 \text{ р./шт.}$$

Себестоимость обработки коленчатого вала тракторного двигателя по разработанной технологии составляет:

$$C_p = 177,65 + 54,35 + 300 + 461,89 = 993,89 \text{ р.}$$

По отчетным данным предприятия существующая себестоимость восстановления коленчатого вала методом шлифования под ремонтный размер (базовый вариант) $C_p = 3\,830$ р./шт.

С учетом дополнительных затрат на ФАБО себестоимость восстановления возрастет до $C_{pp} = 4823,89$ р./шт.

В тоже время, с учетом того, что операция ФАБО может осуществляться вместо операции полирования, то фактически себестоимость восстановления можно считать неизменной [8, 11].

Также следует учесть, что замена операции чистового шлифования на операции ФАБО с использованием имеющегося оборудования позволяет переоборудовать шлифовальный станок 3А423 (1989 года выпуска) для проведения операций фрикционного нанесения композиционных противоизносных покрытий в процессе ФАБО шеек коленчатых валов по разработанной технологии.

Дополнительно для проведения операций технологического процесса «ФАБО коренных и шатунных шеек коленчатого вала» потребуется изготовление специальных приспособлений, доработка системы подачи технологических сред, защита станка от агрессивных сред и некоторые другие.

Расчетный период составляет в соответствии со сроком службы оснастки по существующему варианту и по проектному варианту – 6 лет. За расчетный год принимается 2021 год.

Капитальные вложения в технологический процесс представлены в таблице 5.1.

Исходные данные и расчет экономического эффекта по базовой и разработанной технологиям представлены в таблицах 5.2 и 5.3.

Оценка значений экономических эффектов по вариантам в связи с разным расчетным периодом (жизненным циклом мероприятия) может быть произведена по величине среднегодового экономического эффекта с учетом дисконтирования.

Расчет среднегодового экономического эффекта проводится делением взвешенного интегрального экономического эффекта за расчетный период на сумму коэффициентов приведения по годам того же периода [57, 72]:

$$\mathcal{E} = \frac{\sum \mathcal{E}_t}{\sum \alpha_t}, \quad (5.11)$$

где $\sum \alpha_t$ – суммарный коэффициентов приведения;

Таблица 5.1 – Капитальные вложения при восстановлении коленчатых валов ДВС АТТ по базовой и разработанной технологиям

Базовая технология			Разработанная технология		
Применяемое оборудование	Кол–во	Цена, тыс. р.	Применяемое оборудование	Кол–во	Цена, тыс. р.
1. Шлифовальный станок марки 3А423	1	43 499	1. Шлифовальный станок марки 3А423	1	43 499
2. Шлифовальный станок марки 3А423 (1989 года выпуска)	1	26 999	2. Стоимость шлифовального станка 3А423 с модернизацией для проведения ФАБО	1	36 501
И т о г о:		70 498	И т о г о:		80 000

Таблица 5.2 – Исходные данные и расчет экономического эффекта от использования технологического процесса шлифования коленчатых валов (базовая технология) для условий ООО «АгроУспех» (г. Ростов-на-Дону)

Показатели	Г о д ы					
	2021 (расч.)	2022	2023	2024	2025	2026
1. Результаты						
1.1. Программа восстановления коленчатых валов, тыс. шт. в год	80	80	80	80	80	80
1.2. Цена отремонтированного колен вала, р.	1050	1050	1050	1050	1050	1050
1.3. Стоимостная оценка результатов, тыс. р.	84	84	84	84	84	84
1.4. Тоже с учетом фактора времени	84,0	75,6	68,9	63	57,1	47
1.5. Тоже с нарастающим итогом	84,0	159,6	228,5	291,5	348,6	395,6
2. Коэффициент приведения	1,00	0,90	0,82	0,75	0,68	0,56
3. Затраты						
3.1. Единовременные затраты, тыс. р.	70,498	–	–	–	–	–
3.2. Ликвидационное сальдо	–	–	–	–	–	–
3.3. Текущие издержки (себестоимость) на восстановление 1–го коленчатого вала, р.	810	810	810	810	810	810
3.4. Текущие издержки на весь объем производства, тыс. р.	64,8	64,8	64,8	64,8	64,8	64,8
3.5. Затраты на мероприятия внедрения, тыс. р.	64,8	64,8	64,8	64,8	64,8	64,8
3.6. Тоже с учетом фактора времени	64,8	58,3	53,1	48,6	44,1	36,3
3.7. Тоже с нарастающим итогом	64,8	123,1	176,2	224,8	268,9	305,2
4. Экономический эффект нарастающим итогом, р.						90,4
5. Среднегодовой экономический эффект с учетом дисконтирования, тыс. р.						10,76

Таблица 5.3 – Исходные данные и расчет экономического эффекта от использования технологического процесса ФАБО шеек коленчатых валов (разработанная технология) для условий ООО «АгроУспех»

Показатели	Г о д ы					
	2021 (расч.)	2022	2023	2024	2025	2026
1. Результаты						
1.1. Программа восстановления, тыс. шт. в год	80	80	80	80	80	80
1.2. Цена отремонтированного коленчатого вала р.	1500	1500	1500	1500	1500	1500
1.3. Стоимостная оценка результатов, тыс. р.	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0
1.4. Тоже с учетом фактора времени	120,0	108,0	96,0	90,0	81,6	67,2
1.5. Тоже с нарастающим итогом	120,0	228,0	324,0	414,0	495,6	562,8
2. Коэффициент приведения	1,00	0,9	0,82	0,75	0,68	0,56
3. Затраты						
3.1. Единовременные затраты, тыс. р.	9,502					
3.2. Ликвидационное сальдо, тыс. р.	–	–	–	–	–	–
3.3. Текущие издержки (себестоимость) на восстановление 1–го коленчатого вала, р.	993,89	993,89	993,89	993,89	993,89	993,89
3.4. Текущие издержки на весь объем производства, тыс. р.	79,51	79,51	79,51	79,51	79,51	79,51
3.5. Затраты на мероприятия внедрения, тыс. р.	0,994	0,994	0,994	0,994	0,994	0,994
3.6. Тоже с учетом фактора времени	0,994	0,895	0,815	0,746	0,676	0,557
3.7. Тоже с нарастающим итогом	0,994	2,446	3,261	4,007	4,683	5,240
4. Экономический эффект нарастающим итогом, руб.						557,56
5. Среднегодовой экономический эффект с учетом дисконтирования, тыс. р.						118,37

– по базовой технологии

$$\Sigma\alpha_t = 1,33+1,21+1,1+1+0,9+0,82+0,75+0,68+0,56=8,4;$$

– по разработанной технологии

$$\Sigma\alpha_t = 1,0+0,9+0,82+0,75+0,68+0,56=4,71.$$

Среднегодовой экономический эффект равен:

– по базовой технологии:

$$\mathcal{E}^B = \Sigma \mathcal{E}_T^B / \Sigma\alpha_t = 90,4 / 8,4 = 10,76 \text{ тыс. р.}$$

– по разработанной технологии:

$$\mathcal{E}^H = \Sigma \mathcal{E}_T^H / \Sigma\alpha_t = 557,56 / 4,71 = 118,37 \text{ тыс. р.}$$

Следовательно, при внедрении новой технологии предприятие получит дополнительную прибыль в размере

$$\Delta\Pi = \mathcal{E}^H - \mathcal{E}^B = 118,37 - 10,76 = 107,61 \text{ тыс. р.}$$

Срок окупаемости затрат составит

$$\text{Ток} = \Delta K / \Delta\Pi = (80\,000 - 70\,498) / 107,61 = 32 \text{ рабочих дней.}$$

5.4. Выводы по главе 5:

1. По результатам научных и опытно-конструкторских исследований в диссертации разработан новый технологический процесс нанесения антифрикционных покрытий алитированием на коренные и шатунные шейки коленчатых валов ДВС, включающей в себя операции очистки (обезжиривания), натира-ния, очистки и дефектовки.

2. Основные результаты исследований были в необходимом объеме до-жены и обсуждены на международных научно-практических конференциях и ряде других научно-технических мероприятиях, где получили одобрение и под-держку.

3. Опытное внедрение разработанной технологии восстановления колен-чатых валов осуществлено в ООО «АгроУспех» (г. Ростов-на-Дону) и в учебный процесс Института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н.

Костякова ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, где используются при чтении лекций и проведении практических занятий 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.

Таблица 5.4 Общая оценка экономической эффективности результатов работы

Показатели	Единицы измерения	Условные обозначения	Технология	
			Базовая	Разработанная
Программа	шт.	А	80	80
Цена восстановления	Р.	Ц _в	1050	1500
Стоимостная оценка результатов с учетом фактора времени	тыс. р.	Р _т	395,6	562,8
Капитальные вложения	тыс. р.	К	70,49	80,00
Текущие издержки	тыс. р.	И	64,8	79,51
Затраты на внедрение с учетом фактора времени	тыс. р.	З _т	305,2	5,240
Экономическая эффективность	тыс. р.	Э _т	10,76	118,37
Прибыль	тыс. р.	ΔП	107,61	
Срок окупаемости	дней	Т _о	32	

4. Экономический эффект от внедрения проектных предложений технологии в ООО «АгроУспех» (г. Ростов-на-Дону) за расчетный период за 6 лет – с 2021 по 2026 годы – составит 107,61 тыс. р. 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 2.7) 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 базовой микротвердостью НВ 280 ($H_u = 2800$ МПа) после нанесения композиционных антифрикционных покрытий по разработанной технологии позволили установить, что на обработанных поверхностях формируется наклеп

до НВ 375 ($H_\mu = 3750$ МПа). При этом зона наклепа поверхностных слоев образцов с покрытием наблюдается на глубине $d = 15 \dots 35$ 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 процесса «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 задиры 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 авто-тракторных 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 ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский К.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий.– М.: Наука, 1976. – 278 с.
2. Ажипко Н.А., Крючков Г.С. Исследование минимальной толщины масляного слоя в шатунных подшипниках двигателя СМД–62. Харьков, 1980.– 12 с.
3. А.с.115744 СССР. Способ придания поверхности металлов трущихся пар противозадирных свойств / Д.Н. Гаркунов, В.Н. Лозовский. – 4 с.
4. А. с. 1293126 СССР. Состав для нанесения покрытий / А.К. Прокопенко, С.И. Голина, Д.Н. Гаркунов, Ю.С. Симаков, В.Ф.Иванов, Ф.Х. Бурумкулов.4 с.
5. А. с. 1601198 СССР. Устройство для фрикционно-механического нанесения покрытий / В.Н. Быстров, С.И. Белозерцев. Л.К. Джабаев, А.Н. Стрельников. – 4 с.
6. Балабанов В.И. Финишная антифрикционная безабразивная обработка деталей дизелей // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1996. № 12. – С. 23...25.
7. Балабанов В.И., Быстров В.Н. Особенности проведения лабораторных испытаний материалов сопряжения «шейка коленчатого вала – вкладыш» тракторных двигателей в режиме избирательного переноса // Межвузовский сборник "Безызносность–92". Ростов–на–Дону, 1992. – С. 18–25.
8. Балабанов В.И. Повышение ресурса дизелей фрикционным латунированием шеек коленчатых валов в ремонтном производстве. Дис. ... канд. техн. наук. – М.: МИИСП, 1992. – 200 с.
9. Балабанов В.И. Новые технологические методы повышения ресурса сельскохозяйственной техники / Инженерно-техническое обеспечение АПК. М.: 1994. № 3. – С. 17...18.
10. Балабанов В.И., Быстров В.Н., Потапов Г.К. Методические рекомендации по дипломному проектированию «Разработка технологических процессов ФАБО деталей машин». М., МИИСП. – 25 с.
11. Балабанов В.И. Повышение долговечности двигателей внутреннего

сгорания сельскохозяйственной техники реализацией избирательного переноса. Дис. ... доктора. техн. наук. –М.: МГАУ, 1999. – 516 с.

12. Балабанов В.И., Ищенко С.А., Беклемышев В.И. Триботехнология в техническом сервисе машин. М., – Изумруд, 2005. – 190 с.

13. Балабанов В.И., Добряков Д.В. Анализ технологий восстановления коленчатых валов автотракторной техники // Агроинженерия, 2024. Т.26. № 5. С. 31-38.

14. 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.

15. Балабанов В.И., Ивахненко Н.Н., Добряков Д.В. Теоретические основы нанесения фрикционных покрытий. Агроинженерия, 2025. Т.26. № 5. С.61-67.

16. 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.

17. 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.

18. Балабанов В.И., Ивахненко Н.Н., Добряков Д.В., Морозов А.В. Технологические составы для фрикционного нанесения покрытий. База данных № 2025626041, 2025.

19. 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.

20. 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.

21. 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.

22. Белый А.А. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств трущихся деталей нанесением прирабочных пленок. Дис. ... канд. техн. наук. – Брянск, 1980. – 114 с.

23. Берман С.Х. Применение дисперсных отходов зачистки слитков высоколегированных сплавов для восстановления деталей сельскохозяйственной техники плазменным напылением. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Кишинев, КСХИ, 1989. – 21 с.

24. Богомолова Л. Машиностроение: возрождение на качественно новой основе. Интервью вице-премьера, министра сельского хозяйства А.Гордеева. Содружество, № 21. 2003. – С. 2.

25. Борисов Ю.С., Клейман А.Ш., Берман С.Х. Методика получения равнотолщинных газотермических покрытий // Интенсификация процессов и повышения качества восстановления деталей / Межвузовский сборник научных статей. – Кишинев, 1987. С. 67 – 70.

26. Боуден Ф.П., Тейлор Д. Трение и смазка твердых тел. – М.: Машиностроение, 1968. – 384 с.

27. Быстров В.Н. Исследования изнашивания и безабразивной обработки лезвия инструмента машин скользящего резания кожевенно-обувных и текстильных материалов. Дис. ... канд. техн. наук. – М.; 1984. – 145 с.

28. Быстров В.Н. Избирательный перенос при трении – новые возможности при изготовлении и использовании машин / Эффект безызносности и триботехнологии. №. 1, 1992. – С.17...33.

29. Восстановление деталей машин: Справочник / Ф.И. Пантелеенко, В.П.

Лялякин, В.П. Иванов, В.М. Константинов. Под ред. В.П. Иванова. – М. Машиностроение, 2003. – 672 с.

30. Выскребенцев Н.А., Мельников О.М., Чавтараева Т.С. Оценка надежности и долговечности соединения вал–манжета /Технологии и средства технического сервиса машин в агропромышленном комплексе. М.; 2000. С. 16 – 19.

31. Вялкин В.А., Ляпин Р.М., Хромов В.Н. Комбинированный газо–электросварочный аппарат с отдельным получением водорода и кислорода электролизом воды. Материалы научно–практической конференции «Состояние и перспективы восстановления, упрочнения и изготовления деталей». – М.: ГОСНИТИ, 1999. С.162 - 164.

32 Гаркунов Д.Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1989. – 238 с.

33. Гаркунов Д.Н. Триботехника (пособие для конструктора). – М.: Машиностроение, 1999. – 336 с.

34. Гаркунов Д.Н. Триботехника. Износ и безызносность. – М.: Машиностроение, 2001. – 616 с.

35. Гаркунов Д.Н. Научные открытия в триботехнике. – М.: Машиностроение, 2004. – 383 с.

36. Гнусов Ю.В. Несущая способность градиентных самосмазывающихся покрытий // Международный симпозиум по трибофатике. М.: ИМаш, 1996. – С. 44 – 45.

37. ГОСНИТИ – 50 лет. Поиск ученых и практический результат. Содружество. № 21. 2003. – С.5.

38. ГОСТ 23.224–86. Обеспечение износостойкости изделий. Методы оценки износостойкости восстановленных деталей. – М.: Из–во стандартов, 1986. – 28 с.

39. ГОСТ 27860–88. Детали трущихся соединений. Методы измерения износов. – М.: Из–во стандартов, 1986. – 29 с.

40. Григорьев М.А., Долецкий В.А. Отечественный и зарубежный опыт повышения надежности и долговечности автомобильных двигателей,– М.: НИИАвтопром, 1973. – 172с.

41. Гурвич И.Б. Долговечность автомобильных двигателей. – М., Машиностроение, 1967. – 103 с.
42. Демьянов Л.А., Сарафанов С.К. Пути повышения надежности и долговечности автотракторных двигателей. М., Военное издательство, 1967. – 152 с.
43. 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.
44. Добряков Д.В., Мареева О.В. Разработка технологии нанесения антифрикционных покрытий / Новые технологии при использовании техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве». Тамбов, 2025 г. С. 294-296.
45. Долговечность трущихся деталей машин / Под ред. Д.Н. Гаркунова. – М.: Машиностроение, 1987. В.2. – 304 с.
46. Долговечность трущихся деталей машин / Под ред. Д.Н. Гаркунова. – М.: Машиностроение, 1988. В.3. – 271 с.
47. Долговечность трущихся деталей машин / Под ред. Д.Н. Гаркунова. – М.: Машиностроение, 1990. В.4. – 352 с.
48. Долговечность трущихся деталей машин / Под ред. Д.Н. Гаркунова. – М.: Машиностроение, 1990. В.5. – 368 с.
49. Елин Л.В. Некоторые характеристики трения в условиях граничной смазки // Трение и износ в машинах. – М., Из-во АН СССР, 1937. – С. 227–301.
50. Ерохин М.Н. Принципы повышения надежности и эффективности эксплуатации сельскохозяйственной техники (на примере картофелеуборочных комбайнов). Дис. ... докт. техн. наук. М., МГАУ, 1994. – 76 с.
51. Зимин Н.Е. Анализ экономических результатов деятельности финансового состояния и оценка эффективности работы предприятия. Методические рекомендации по выполнению курсовой работы. – М., МГАУ, 2004. – 32 с.
52. Инструкция. Применение финишной антифрикционной безабразивной обработки и металлоплакирующей присадки МКФ–18У при обкатке автомобильных бензиновых двигателей, прошедших капитальный ремонт. –

М., НИИАТ, 1988. – 8 с.

53. Ищенко С.А. Диагностирование и ремонт гусеничного движителя рисозерноуборочных комбайнов в условиях Дальнего Востока. Дис. ... доктора. техн. наук. М.: МГАУ, 2009.– 429 с.

54. Карпенков В.Ф. Повышение ресурса мобильной сельскохозяйственной техники формированием поверхностей трения с заданными триботехническими свойствами. Автореф. дис. ... доктора. техн. наук. М.: МГАУ, 1996.– 32 с.

55. Кащеев В.Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов.– М., Машиностроение, 1978.

56. Китаев Ю.А., Спицын И.А., Китаев А.Ю. Восстановление деталей с последующей ФАБО / Механизация и электрификация сельского хозяйства, 1995, № 1. С. 29 – 32.

57. Конкин Ю.А., Зимин Н.Е., Копчиков В.П. Анализ хозяйственной деятельности предприятий технического сервиса агропромышленного комплекса. Методические рекомендации по выполнению курсовых работ. – М.: МГАУ, 2004. – 36 с.

58. Конкин Ю.А., Осинцов В.И., Бурумкулов Ф.Х. Методические указания по определению себестоимости восстановленных деталей, узлов, агрегата машин. – М.: МИИСП, 1983. – 25 с.

59. Кудинов В.В. Плазменные покрытия. – М.: Наука, 1997, – 184 с.

60. Куксенова Л.И. Закономерности структурных изменений и массоперенос в поверхностных слоях и их влияние на износ трибосопряжений медный сплав–сталь. Дис. ... докт. техн. наук. М.: 1990. – 475с.

61. Куриной В.Г. Метод исследования и оценки устойчивости антифрикционных покрытий / Тезисы докладов II– Международного конгресса «Защита–95». – М., ГАНГ, 1995 – С. 153.

62. Лозовский В.Н. Фрикционное латунирование как метод повышения антифрикционных свойств стальных деталей авиационной техники. Дис. ... канд. техн. наук,– М., 1961. – 179 с.

63. Лялякин В.П., Бурумкулов Ф.Х., Лельчук Л.М., Тошметов Р.Г. Условия эксплуатации двигателей ЯМЗ–238 НБ и надежность коленчатых валов / Материалы Всероссийского научного семинара. М., 1996 . – С. 51–52.

64. Лялякин В.П., Поляченко А.В. Современные требования к качеству отремонтированных машин и восстановленных деталей и пути его обеспечения / Технологии ремонта машин и механизмов. Ремонт–98. Киев. 1998. – С. 8–11.

65. Лялякин В.П., Сумеров А.М., Очковский Н.А. Обратная пара – путь повышения надежности соединения вал – подшипник / Технический сервис в АПК. М., МГАУ, 2002. – С. 11–14.

66. Лялякин В.П., Литовченко Н.Н. Восстановление коленчатых валов автотракторных двигателей электродуговой металлизацией // Технология металлов. 2001. № 10. – с. 31.

67. Мельников А.М., Синотов К.А., Колокатов А.М. Качество поверхностного слоя гильз цилиндров после окончательного алмазного хонингования эластичными брусками // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ / Технический сервис в агропромышленном комплексе. М., 2003. С. 142...144.

68. Металлизатор электрический ЭМ–14. Паспорт. Барнаул. Полиграфист. 1982. – 24 с.

69. Методические рекомендации по восстановлению коленчатых валов автомобильных и тракторных дизелей – М.: Центральное бюро научно–технической информации. 1985. – 25 с.

70. Михин Н. М. Внешнее трение твердых тел. М.: Наука, 1977. – 219 с.

71. Мюке В. Избирательный перенос рабочего материала в подшипниках скольжения / Исследования по триботехнике. – М.: Из–во НИИ информации по машиностроению. 1975. – С. 225...233.

72. Наливкин В.А. Методика определения экономической эффективности от внедрения и использования новых технологических процессов восстановления деталей // Работы в области восстановления и упрочнения деталей. Ч.1. – М.: МДТНТП, 1991. – с. 34–38.

73. Намаконов В.В., Кисель В.В., Лялякин В.П. Повышение долговечности гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания способом ФАБО / Долговечность трущихся деталей машин. Под ред. Д.Н. Гаркунова. – М., Машиностроение, 1990, Т.4. – С. 139–145.

74. Некрасов С.С., Байкалова В.Н., Колокатов А.М. Определение технической нормы времени станочных операций. Методические рекомендации. – М.: МГАУ, 1995. – 20 с.

75. Некрасов С.С., Паршин И.П., Приходько И.Л. Антифрикционные покрытия деталей и эффективность их применения. Обзорная информация / АгроНИИ ТО. – М., 1988. – 28 с.

76. Некрасов С.С. Пути повышения качества ремонта двигателей / Технологии и средства технического сервиса машин в агропромышленном комплексе. М.; 2000. С. 3–9.

77. Некрасов С.С., Приходько И.Л. Стендовые испытания гильз цилиндров двигателя ЗМЗ–53 после ФАБО / Совершенствование хозрасчетных отношений, повышение качества ремонта и использование техники в сельском хозяйстве. М.; 1991, С. 29–32. .

78. Некрасов С.С., Приходько И.Л. Эксплуатационные испытания двигателей ЗМЗ–53 с гильзами цилиндров, обработанные методом ФАБО / Совершенствование хозрасчетных отношений, повышение качества ремонта и использование техники в сельском хозяйстве. М.; 1991, С. 23–29.

79. Носихин П.И. Повышение качества и ускорение обкатки отремонтированных дизелей на основе современных достижений триботехники. Автореф. дис. ... доктора. техн. наук. – М.: МГАУ, 1997. – 32 с.

80. Носихин П.И. Финишная антифрикционная безабразивная обработка отремонтированных гильз цилиндров // Эффект безызносности и триботехнологии. М., Наука, 1997. № 1 – С. 49–53.

81. Остапенко А.В., Торсцкий Ю.А. Способ построения диаграммы нагрузки на шатунные и коренные шейки коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания. – Горловка, 1988. – 12 с.

82. Ошеров. А. За порогом продовольственной безопасности. Содружество. № 21. 2003. – С.3.

83. Оценка качества покрытий, полученных финишной антифрикционной безабразивной обработкой поверхностей // Вестник машиностроения / Л.И. Куксенова, Н.А. Назаров, Ю.А. Кисель, В.М. Самылкин, А.Г.Андреева, Л.М. Рыбакова. – М., Машиностроение, № 11, 1994. с. 28...36

84. Патент РФ № 2064975. Способ нанесения антифрикционного покрытия при антифрикционной безабразивной обработке гильз цилиндров // Паршин И.П., Стрельцов В.В., Носихин П.И., Байкалова В.Н. / Изобретения 1996.

85. Патент СССР № 18349137. Устройство для фрикционно–механического нанесения покрытий // В.И. Балабанов, В.Н. Быстров / Изобретения. 1993. № 30.

86. Патент РФ № 2004622. Состав для фрикционно–механического нанесения покрытий // В.И. Балабанов, В.В. Челюбеев // БИ, 1993, № 45.

87. Патент РФ 2162774. Устройство для газопламенной обработки материалов / Хромов В.Н., Семешин А.Л. // Изобретения, 2001, № 4.

88. Пичугин В.Ф. Повышение износостойкости узлов трения бурового оборудования и инструмента за счет формирования на антифрикционных поверхностях трибометаллсодержащих пленок. – Дис. ... докт. техн. наук. – М., 1989. – 610 с.

89. Погоньшев В.П. Повышение износостойкости восстановленных узлов трения сельскохозяйственных машин фрикционным нанесением пленок пластичных металлов. Автор дис ... канд. техн. наук. – Калинин, 1990. – 16 с.

90. Польцер Г., Майснер Ф. Основы трения и изнашивания. Пер. с нем. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.

91. Польцер Г., Фирковский А., Ланге И., Майснер Ф. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) и избирательный перенос // Сб. Долговечность трущихся деталей машин. Под ред. Д.Н. Гаркунова. – М., Машиностроение. Вып. 4. 1990. – С. 86–122.

92. Приходько И.Л. Повышение послеремонтного ресурса гильз цилиндров автотракторных двигателей финишной антифрикционной безабразивной обработкой (ФАБО). Автореф. дис. ... канд. техн. наук – М. 1993. – 16 с.

93. Проников А.С. Надежность машин. – VI. Машиностроение, 1978. – 316 с.

94. Потапов Г. К., Балабанов В.И. Исследование наклепа подповерхностных слоев стальных деталей в процессе финишной антифрикционной безабразивной обработки // Сб. трудов МИИСП.– М., МИИСП., 1991. С, 55...58.

95. Потапов Г.К., Балабанов В.И. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) гильз цилиндров и шеек коленчатых валов / Эффект безызносности и триботехнологии. М., Наука, 1994., № 3–4. – С. 48...53.

96. Пучин Е.А., Петрищев А.Н., Русанов В.М. Система технического обслуживания тракторов в современных условиях / Механизация и электрификация сельского хозяйства, 1998, № 4. – С. 30–31.

97. Пучин Е.А., Петрищев А.Н. и др. Оценка технического состояния / МТС, 1999, №7. – С. 50–55.

98. Пучин Е.А., Петрищев А.Н. Технический сервис машин сельскохозяйственного назначения / Техника и оборудование для села, 2000, № 6. – С. 24.

99. Рекомендации по восстановлению коленчатых валов автомобильных и тракторных дизелей индустриальными методами – М.: ГОСНИТИ, 1988. – 32 с.

100. Ремонт машин / Под. ред. Н.Ф. Тельнова. – М.: Агропромиздат, 1992. – 560 с.

101. Руководство по применению финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО) деталей, технологического состава СФП–2 (3) и металлоорганической присадки «Велап» при капитальном ремонте, обкатке и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания. РТМ 10 РОССИЯ 01.0018–92.– М., 1992.– 12с.

102. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла.– М.: Машиностроение, 1982. – 209 с.

103. Рыбакова Л.М. Исследование структурных нарушений –деструкции пластически деформированного металла. – Дис. ... докт. техн. наук. – М., 1978.– 405 с.

104. Рыков О.А. Экологические основы эксплуатации автомобильного транспорта. – Челябинск: ЧПИ, 1989. – 124 с.

105. Северный М.М. Износ деталей сельскохозяйственных машин. – Л., Колос, 1972. – 430 с.

106. 3. Синотов К.А. Повышение износостойкости восстановленных шеек коленчатого вала / Сборник материалов 2-ой международной научно-технической конференции «Надежность и ремонт машин». Гагры, 2005. С. 14.

107. Словарь–справочник по трению, износу и смазке деталей машин / Е.Л. Шведков, Д.Я. Ровинский, В.Д.Зозуля, Э.Д.Браун. – Киев: Наукова думка, 1979. – 185с.

108. Снитковский М.М. Влияние механо–химических взаимодействий на эффективность прирабочных покрытий // Избирательный перенос при трении и его эффективность. Материалы семинары. – М: МДНТП, 1972. – С. 50...52.

109. Стрельцов В.В., Карпенков В.Ф., Приходько И.Л., Попов В.Н. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) деталей. Пущино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1996. 130 с.

110. 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.

111. Терхунов А.Г. Метод финишной антифрикционной безабразивной обработки цилиндров и коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания // Трение, износ и смазочные материалы / Тр. международной научной конференции. Тезисы докладов в 5–ти томах. –Ташкент, 1985. Т.5. –с. 3...4.

112. Тракторные дизели. Справочник / Под ред. И.В. Взорова. – М.: Машиностроение, 1981. – 535.

113. Трение, изнашивание, смазка. Справочник в 2 книгах. Книга 2. Под ред. И.В. Крагельского. – М.: Машиностроение, 1979. С.23.

114. 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.

115. Харченко М.И. Повышение послеремонтного ресурса деталей автомобильных двигателей (на примере ЗИЗ–53) эпиламинированием и ФАБО–эпиламинированием. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., МГАУ, 2002. – 16 с.

116. Харченко М.И. Влияние эпиламинирования и ФАБО на показатели процесса трения образцов / Диагностика, надежность и ремонт машин. М.; 2001, № 1. – С. 23–24.

117. Финишная антифрикционная безабразивная обработка, как средство повышения срока службы машин и оборудования // Долговечность трущихся деталей машин / Под ред. Д.Н. Гаркунова / Андреева А.Г., Бурумкулов Ф.Х., Толоконников В.И., Куксенова Л.И., Рыбакова Л.М. – М.: Машиностроение, 1990, В.4.– С.34...59.

118. Черепанов С.С., Северный А.И., Емелин Л.И., Баграмов Л.Г. и др. Концепция развития технического сервиса АПК на период до 2005 года. М., ГОСНИТИ. 1990. 19 с.

119. Черепков С.А., Хромов В.Н. Повышение межремонтного ресурса коленчатых валов автотракторных двигателей финишной антифрикционной безабразивной обработкой (ФАБО) / Инженерно–техническое обеспечение АПК и машин. Орел. 2000; Т.2. – С. 8 –11.

120. Черноиванов В.И. Методика и рекомендации по восстановлению деталей способами газотермического напыления. М., ГОСНИТИ, 1983. – 63 с.

121. Черноиванов В.И. Чужим хлебом – сыт не будешь.. Содружество. № 21. 2003. – С. 3.

122. Черноиванов В.И., Бледных В.В., Северный А.Э., Лялякин В.П. Ольховацкий А.К. Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве. Москва – Челябинск.: ЧГАУ, 2001. – 600 с.

123. Чекулаев О.В., Агеенко В.Н., Терешкин С.А., Симонов Г.В. Технология латунирования деталей из жаропрочных сталей // Передовой опыт. 1986. №

10. – С. 15–19.

124. Челюбеев В.В. Разработка и оптимизация режимов фрикционного латунирования для улучшения приработки гильз цилиндров двигателей в условиях ремонтного производства – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., МГАУ, 1998. – 16 с.

125. Экономическое обоснование внедрения мероприятий научно-технического прогресса в АПК. Методические рекомендации и примеры расчета. Ю.А. Конкин, А.Ф. Пацкалев, А.И. Лысюк и др. – М.: 1991. – 80 с.

126. Balabanov V.I., Dobryakov D.V., Alipichev A.Yu. Developing the technology of friction alitising. *Agricultural Engineering*, 2023; 25 (5): С. 52-56.

127. 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.

128. Engel–Herbert H. Schumann. Reibpaarungen–Beispiele für die Wirkung von phusikalischen Gesetzen der Selbstorganisation. *Smierungstechnik*, Berlin 18. (1987).– S. 74...78.

129. Fleisher G. Terminologie «Reibung und Verschleiß». Teil IV, *Schmierungstechnik*, 3. 1972.– H. 12.

130. Garkunow D.N. Einige Erkenntnise zu der Prozessen bei der selektiven Übertragung // *Schmierungstechnik. Fachzeitsschrift für Tribotechnik*. Verlag Technik Gmb H, Berlin, 1990, H.12.– S. 361...362.

131. Marczak R., Stand und notwendige Entwicklungsrichtungen beim Effekt der selektiven Übertragung, *Smierungstechnik*, Berlin 21.(1990). H. 12,–S. 366...367.

132. Polzer G.imd an.Reibbeschichten und selektiven Übertragung, *Zwikkau*, 1988. –88s.

133. Polzer G. Selective Übertragung und Reibbeschichten, *Zwikkau*, 1989. – 6 s.

134. Reinhold Hans–Joachim. Verchleißminderung durch Aufreiben von Messing. BV–15–77. *Zwikkay*, 1981. – 230 s.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Дубл.			
Взаим.			
Подп.			

11-РФ-049297

049297. 02170. 000

12

1

049297.02170.000

Вал коленчатый

01

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ (ФГБНУ)
 «РОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ИНФОРМАЦИИ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
 ПО ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА» (РОСИНФОМАГРОТЕХ)

КОМПЛЕКТ ДОКУМЕНТОВ

технологического процесса финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО)
 шатунных и коренных шеек коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания

«СОГЛАСОВАНО»
 Генеральный директор
 ООО «АгроУспех»
 С.П. Бровков
 «___» _____ 2025 г.



М.В. Дулясова

« 18 » июня 2025 г.

Аспирант ФГБНУ «Росинформагротех»

Д.В. Добряков

« 12 » июля 2025 г.

И.о. зав. кафедрой сельскохозяйственного строительства
 ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

В.И. Балабанов

« 12 » июля 2025 г.

Внедрен актом № 01-25 от «___» _____ 2025 г.

ТЛ

ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ

Дубл.																										
Взаим.																										
Подп.																										
Разработал	Добряков Д.В.								ФГБНУ «РОСИНФОРМАГРОТЕХ»																	
Проверил	Балабанов В.И.																									
Н.контроль	Балабанов В.И.																									
А	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код, наименование операции										СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт.	Тлз	Тшт	
Б	Код, наименование оборудования																									
К/М	Наименование детали, сборочной единицы, материала														Обозначение, код						ОПП	ЕВ	ЕН	КИ	Н.расх.	
A01	005				Очистная																					
B02	Установка моечная ОМ-4944										M			2	T	1										
B03	Подвеска, кран обдувной																									
M04	Моющее средство МС-15 ТУ 38-10738-73, концентрация 20 г/л																									
P05	температура 70...75 °С, время 3...5 мин.																									
A06	010				Дефектовочная																					
B07	Стол для дефектации ОРГ-14-6801-090 ГОСНИТИ										P			5	H	1	1									
A08	015				Кругло-шлифовальная																					
B09	Станок кругло-шлифовальный ЗУ131ВМ										M			4	H	1	1									
M10	Круг абразивный 25А16НС2КЗ, ГОСТ 2424-83																									
A11	020				Алитуирование (ФАБО)																					
B12	Устройство для нанесения покрытий												4	T	1	1										
B13	Алюминиевый сплав АД-31 ГОСТ 4782-97																									
МК		Маршрутная карта ремонта																								

Дубл.																					
Взаим.																					
Подп.																					
Разработал	Добряков Д.В.								ФГБНУ «РОСИНФОРМАГРОТЕХ»												
Проверил	Балабанов В.И.																				
Н.контроль	Балабанов В.И.																				
А	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код, наименование операции																
Б	Код, наименование оборудования										СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт.	Тлз	Тшт
К/М	Наименование детали, сборочной единицы, материала										Обозначение, код					ОПП	ЕВ	ЕН	КИ	Н.расх.	
М14	Технологическая жидкость (Патент на изобретение RU № 2821971)																				
А15	025 Очистная																				
Б16	Стол монтажный 105.81.50.00.00										Р		2	Н	1	1					
А17	030 Контрольная																				
Б18	Станок кругло-шлифовальный 3У131ВМ										Р		5	Н	1	1					
М19	Круг алмазный 1А1АС663/50МВ1																				
А20	035 Консервационная																				
Б21	Верстак ОРГ-1468-01-060А										Р		5	Н	1	1					
М20	Глицерин ГОСТ 7482-96																				
МК	Маршрутная карта ремонта																				

Дубл.																
Взаим.																
Подп.																
Разраб.	Добряков Д.В.					ФГБНУ «РОСИНФОРМАГРОТЕХ»	60 – 0400900 Р1/Р4 СБ - 11						049297.02170.000			
Пров.	Балабанов В.И.															
Контр.	Балабанов В.И.					Вал коленчатый										
А	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код, наименование операции				Обозначение документа							
Б	Код, наименование оборудования					СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	К _{шт}	Т _{дз}	Т _{шт}
К/М	Наименование детали, сб. единицы, матер.					Обозначение, код					ОПП	ЕВ	ЕН	КП	Н.расх.	
Р						ПИ	D или B	L	t	i	S	h	V	T _с	T _о	
О 15	3. Протереть поверхности 1 и 2 насухо															
М 16	АБВГ.ХХХХХХ.ХХХ(1) –ветошь ГОСТ 5453-79															
О 17	4. Установить устройство для нанесения покрытий в рабочее положение и обработать поверхность 1															
Р 18						92	48		2	0,32	100	32	0,5	1,5		
О 19	5. Переустановить устройство на 2-ую коренную шейку и обработать поверхность 1															
Р 20						92	50		2	0,32	100	32	0,6	1,6		
О 21	6. Переустановить устройство для нанесения покрытий на 3-ую коренную шейку и обработать															
Р 22						92	50		2	0,32	100	32	0,5	1,5		
О 23	7. Переустановить устройство на 4-ую коренную шейку и обработать поверхность 1															
Р 24						92	50		2	0,32	100	32	0,6	1,6		
О 25	8. Переустановить устройство и обработать поверхность 2 одновременно 1-ой и 4-ой шатунных шеек															
Р 26						85	82		2	0,3	100	32	1,0	2,0		
МК/ОК		Алитирование													8	

☐

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

ООО «АгроУспех»



С. П. Бровков

2025 г.

УТВЕРЖДАЮ

Врио директора Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса», доктор экономических наук, профессор



М.В. Дулясова

« 18 » июля 2025 г.

АКТ № 01-25

опытного внедрения технологического процесса финишной антифрикционной безабразивной обработки (фрикционного алитирования) шеек коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания

Комиссия в составе представителей: ООО «АгроУспех» в составе инженера сервисной службы Пазилова В.А., аспиранта Федерального государственного бюджетного научного учреждения (ФГБНУ) «Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса» (Росинфомагротех) Добрякова Д.В. и представителя Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева» (ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева), и. о. заведующего кафедрой сельскохозяйственного строительства, д. техн. н., профессора Балабанова В.И. составила настоящий акт об опытном внедрении «Технологического процесса финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО) шатунных и коренных шеек коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания», заключающейся во фрикционно-механическом способе (с помощью трения) нанесении алюминий-содержащих антиизносных покрытий.

На основании производственной апробации технологии в конкретных условиях ремонтно-механических мастерских предприятия и результатов эксплуатационных испытаний обработанных коленчатых валов на автомобильном парке предприятия разработчиками

технологии передается в ООО «АгроУспех» для дальнейшего опытного внедрения и использования научно-техническая документация по следующему перечню:

1. Комплект документов технологического процесса: «Финишная антифрикционная безабразивная обработка (алитирование) деталей типа вал».
2. Эскизы приспособления для проведения финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО) шеек коленчатых валов.

Авторы разработанной технологии обязуются оказать научную и технологическую помощь при проведении обработки партии коленчатых валов в объеме опытного внедрения.

От ООО «АгроУспех»:



Инженер сервисной службы

В.А. Пазилев

2025 г.

От Исполнителей:

Аспирант

ФГБНУ «Росинформагротех»

Д.В. Добряков

« 12 » мая 2025 г.

Доктор технических наук, профессор

ФГБОУ ВПО РГАУ-МСХА

им. К.А. Тимирязева

В. И. Балабанов

« 12 » мая 2025 г.



УТВЕРЖДАЮ:
Проректор по науке
ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева
С.С. Макаров
« 15 » 07 2026 г.

СПРАВКА

об использовании результатов научно-исследовательской работы (внедрении)
в учебном процессе

Дана аспиранту ФГБНУ «Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса» («Росинформагротех») **Добрякову Дмитрию Викторовичу** в том, что разработанная им технология фрикционного алитирования поверхностей трения деталей различной техники и оборудования, внедрены в учебный процесс и используются при чтении лекций и проведении практических занятий 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.

Результаты исследований, представленные в монографии «Диагностирование дизельных двигателей мелиоративных и строительных машин» (Н.К. Усманов, И.Ж. Худаев, В.И. Балабанов, Д.В. Добряков, Саратов, Амирит – 2024 г., 80 с.) могут использоваться магистрами и аспирантами кафедры сельскохозяйственного строительства Института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах для повышения надежности мелиоративной и строительной техники.

И.о. директора Института мелиорации,
водного хозяйства и строительства
имени А.Н. Костякова, к.т.н., доцент


Д.М. Бенин

И.о. заведующего кафедрой
сельскохозяйственного строительства
д.т.н., профессор


В.И. Балабанов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2821971

Технологический состав для фрикционно-механического нанесения покрытия натирающим инструментом

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева" (ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева) (RU)*

Авторы: *Балабанов Виктор Иванович (RU), Добряков Дмитрий Викторович (RU)*

Заявка № 2023122292

Приоритет изобретения 28 августа 2023 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 28 июня 2024 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 28 августа 2043 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ОБЪЕМ П. ПОДПИСА. ГОДА ПОДПИСА
С. 10/10/2024. 10/10/2024. 10/10/2024.
Подпись: Ю.С. Зубов. Ю.С. Зубов
А. 10/10/2024. 10/10/2024. 10/10/2024.

Ю.С. Зубов

о государственной регистрации базы данных

№ 2025626041

Технологические составы для фрикционного нанесения покрытий

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева» (RU)*

Авторы: Балабанов Виктор Иванович (RU), Ивахненко Наталья Николаевна (RU), Добряков Дмитрий Викторович (RU), Морозов Антон Викторович (RU)

Заявка № 2025625714

Дата поступления **28 ноября 2025 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре баз данных 11 декабря 2025 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Сергей Николаевич Савин
Бразилья, Дубовый Мост
См. также на стр. 111, 102

Ю.С. Зубов

