

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ – МСХА
имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА»

УДК 62-762

На правах рукописи

ЛАПАЕВ АНДРЕЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ СОЕДИНЕНИЙ «ВАЛ–МАНЖЕТА»
ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ
ТЕХНИКИ**

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук,
Мельников Олег Михайлович

Москва – 2025

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	9
1.1. Анализ состояния парка сельскохозяйственной техники.....	9
1.2. Влияние условий эксплуатации сельскохозяйственной техники на работоспособность соединений «вал–уплотнение».....	12
1.3. Уплотнения, применяемые в сельскохозяйственной технике.....	17
1.4. Дефекты в соединении «вал–манжета».....	20
1.5. Требования к поверхности вала в зоне контакта с уплотнением.....	22
1.6. Методы восстановления рабочей поверхности валов в зоне контакта с уплотнением.....	23
1.7. Анализ работ по упрочнению стальных тонкостенных деталей.....	25
1.8. Упрочнение рабочей поверхности тонкостенной ремонтной втулки хромированием.....	40
1.9. Упрочнение рабочей поверхности тонкостенной ремонтной втулки методом физического осаждения (PVD).....	45
1.10. Выводы, цель и задачи исследования.....	48
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТОНКОСТЕННОЙ РЕМОНТНОЙ ВТУЛКИ	50
2.1. Обоснование толщины тонкостенной ремонтной втулки.....	50
2.2. Обоснование минимального уровня твердости рабочей поверхности тонкостенной ремонтной втулки для соединения «вал–манжета».....	54
2.3. Обоснование оптимального микрорельефа поверхности вала в соединении «вал–манжета».....	60
2.4. Выводы	65
ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	66
3.1. Планирование экспериментальных исследований.....	66
3.2. Методика и оборудование для проведения экспериментальных исследований соединения «вал–манжета».....	66
3.2.1. Методика испытаний рабочей поверхности втулок на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы	67

3.2.2. Методика испытаний для определения сил трения и температуры в зоне контакта втулки с манжетой.....	70
3.2.3. Методика испытаний для определения износостойкости исследуемых соединений.....	72
3.2.4. Методика эксплуатационных испытаний тонкостенных ремонтных втулок.....	78
3.3. Методика определения износа рабочей поверхности втулок профилографированием.....	79
3.4. Обработка результатов экспериментальных исследований.....	83
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ.....	85
4.1. Определение толщины ремонтной втулки для обеспечения заданного суммарного удельного контактного усилия.....	85
4.2. Определение необходимой микротвердости рабочей поверхности тонкостенной ремонтной втулки.....	86
4.3. Изготовление тонкостенных ремонтных втулки по заданным параметрам.....	87
4.4. Результаты экспериментальных исследований.....	92
4.4.1. Результаты испытаний рабочей поверхности втулок на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы	92
4.4.2. Результаты испытаний по определению сил трения и температуры в зоне контакта втулки с манжетой.....	96
4.4.3. Результаты испытаний для определения износостойкости исследуемых соединений.....	102
4.4.4. Результаты эксплуатационных испытаний тонкостенных ремонтных втулок.....	107
4.5. Выводы.....	108
ГЛАВА 5. РАСЧЕТНЫЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ.....	109
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	112
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	113
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	128

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Развитие научно-технического прогресса, усложнение техники и интенсификация режимов эксплуатации обуславливают необходимость повышения надежности сельскохозяйственной техники. В современных условиях основной упор в развитии отечественного машиностроения сделан на инновационные и технологические прорывы, где одной из задач является развивающее импортозамещение, т.е. минимизация зависимости от импортных комплектующих, на основе результатов отечественных разработок машин, оборудования и комплектующих [1]. Развивается и другой подход – опережающее импортозамещение, который предлагается исследователями как способ перехода к производству новых конкурентоспособных видов продукции [2]. Решение этих проблем является драйвером повышения эффективности производства и производительности труда.

Эффективное использование сельскохозяйственной техники зависит от ряда факторов, включающих конструктивно-технологические решения, заложенные при производстве, условия эксплуатации, а также поддержание техники в установленной степени готовности.

Частые отказы сельскохозяйственной техники – показатель недостаточной проработки конструкции узлов и деталей, низкого качества производства, невысокого качества комплектующих, медленного внедрения инноваций. В настоящее время затраты на техническое обслуживание и ремонт в процессе эксплуатации сельскохозяйственной техники в 4–6 раз превышают ее первоначальную стоимость. На долю заводов, выпускающих новые тракторы, приходится лишь 22% производственных мощностей, на долю заводов, изготавливающих запасные части к тракторам, – 34%, на долю ремонтных предприятий – 44%. Таким образом, поддержание работоспособности техники в течение установленного срока эксплуатации тракторов требует почти в четыре раза больше ресурсов, чем на ее производство [3].

Одной из основных причин низкой надежности сельскохозяйственной техники является разрушение подшипниковых узлов. Как показывает статистика,

90% случаев аварийных разрушений подшипниковых узлов вызвано неудовлетворительной работой уплотнений [14]. Это одна из наиболее важных проблем современного машиностроения и других отраслей промышленности.

Главным негативным фактором, сокращающим срок службы подшипников, является воздействие абразивных частиц, которые наносят повреждения деталям. Для предотвращения загрязнения и утечки смазочных материалов подшипниковые узлы оснащаются уплотнительными устройствами.

Потеря герметичности уплотнительных соединений ведет к выходу из строя узлов и агрегатов машин и, соответственно, к длительным простоям техники. Это в свою очередь ведет к необходимости организации внеплановых ремонтных работ и значительному увеличению расхода запасных частей.

Утечки масла через уплотнения в энергонасыщенных тракторах составляют 23–28%, а в гидроагрегатах до 44% от общего числа отказов [29]. Поэтому долговечность техники, используемой в сельском хозяйстве, напрямую зависит от работоспособности уплотнительных устройств. Согласно ТУ на капитальный ремонт – все манжеты подлежат замене. При дефектации агрегатов, направляемых в капитальный ремонт, около 70% валов требуют восстановления рабочих поверхностей в местах контакта с уплотнениями.

Для повышения надежности уплотнительных узлов необходимо учитывать эксплуатационные особенности техники еще на этапе проектирования, а восстановление их функциональности должно обеспечиваться за счет доступного и качественного ремонта.

Степень разработанности. Вопросам повышения надежности техники, совершенствованию технического обслуживания и ремонта в сельскохозяйственном производстве посвящены работы А.С. Апатенко, В.И. Балабанова, В.М. Белова, Д.В. Варнакова, С.М. Гайдара, И.Г. Голубева, О.Н. Дидманидзе, А.С. Дорохова, М.Н. Ерохина, А.И. Иванова, С.П. Казанцева, П.А. Карепина, И.Н. Кравченко, В.М. Корнеева, О.А. Леонова, В.М. Михлина, В.С. Новикова, П.В. Новицкого, Н.С. Пасечникова, Е.А. Пучина, А.И. Селиванова, В.А.

Семейкина, Н.Ф. Тельнова, С.К. Федорова, Н.М. Хмелевой, В.И. Черноиванова, Ю.А. Шамарина, В.М. Юдина и других авторов.

Исследованием конструкций уплотнительных узлов с целью их усовершенствования и повышения надежности работы занимались А.М. Баусов, А.И. Голубев, М.Н. Ерохин, С.П. Казанцев, Л.А. Кольцов, Л.А. Кондаков, О.А. Леонов, Я.Ф. Ракин, А.В. Чичинадзе и др.

Изучению процессов, происходящих в трибосоединениях, и усовершенствованию материалов в соединении «вал–уплотнение», посвящены исследования А.С. Апатенко, В.А. Белого, В.К. Белякова, С.М. Гайдара, Д.Н. Гаркунова, М.В. Голуб, Р.А. Горелика, О.Н. Дидманидзе, Л.А. Кольцова, И.В. Крагельского, В.Н. Лозовского, В.Г. Назарова, Ю.А. Радина, В.П. Столярова, М.М. Тененбаума, М.М. Хрущова, В.С. Юровского и др.

Цель исследования. Разработать метод безразборного восстановления соединения «вал-манжета» подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели исследования предусмотрено решение следующих задач:

1. Выполнить анализ существующих методов восстановления рабочей поверхности вала под манжету;
2. Теоретически обосновать параметры тонкостенных ремонтных втулок для восстановления работоспособности соединения «вал–манжета»;
3. Исследовать влияние упрочнения рабочей поверхности втулки на износостойкость и фрикционные характеристики соединения «вал–манжета»;
4. Разработать технологию изготовления тонкостенной ремонтной втулки;
5. Оценить технико-экономическую эффективность результатов исследований.

Объект исследования. Процесс изнашивания цилиндрической поверхности вала в соединении «вал–манжета» сельскохозяйственной техники.

Предмет исследования. Методы восстановления цилиндрической поверхности вала в соединении «вал–манжета» сельскохозяйственной техники с использованием упрочненной тонкостенной ремонтной втулки.

Научная новизна. Обоснованы параметры тонкостенной ремонтной втулки, обеспечивающие восстановление соединений «вал–манжета» подшипниковых узлов, работающих в условиях абразивного изнашивания.

Теоретическая и практическая значимость работы. Проведен анализ состояния и условий работы машинно-тракторного парка с изучением дефектов деталей соединения «вал–манжета». Проведен анализ существующих способов восстановления посадочных поверхностей валов и определен способ, позволяющий восстановить работоспособность уплотнительных узлов агрегатов сельскохозяйственной техники в минимальные сроки без разборки узла или агрегата в полевых условиях. Проведен расчет толщины тонкостенной ремонтной втулки, обеспечивающей оптимальный функциональный натяг в соединении. Выбраны оптимальные способы упрочнения поверхностного слоя втулки. Разработан технологический процесс изготовления тонкостенной ремонтной втулки для восстановления соединений «вал–манжета».

Проведенные исследования доказали возможность применения тонкостенных ремонтных втулок, как эффективный способ ремонта уплотнительного узла, и позволили изготовить образцы тонкостенных ремонтных втулок с заданными параметрами для проведения испытаний. Стендовые испытания показали уменьшение износа рабочей поверхности упрочненной (TiN) тонкостенной ремонтной втулки в соединении «вал–манжета» по сравнению с серийными валами на 90%. Оценка технико-экономической эффективности результатов исследований показала эффективность предложенного способа ремонта, при себестоимости тонкостенных ремонтных втулок менее 1/16 стоимости зарубежных образцов.

Методология и методы исследований. При выполнении работы использована комплексная методика исследований, включающая теоретический анализ, лабораторные и стендовые испытания уплотнительных узлов. При теоретическом исследовании использовались законы механики, триботехники, статистики. Экспериментальные исследования включали в себя: определение физико-механических свойств рабочей поверхности втулки с использованием

стандартных методик. При обработке собранной информации и полученных результатов использовались вероятностно-статистические методы.

Положения, выносимые на защиту:

- геометрические параметры тонкостенной ремонтной втулки;
- методика определения оптимальной микротвердости рабочей поверхности ремонтной втулки;
- технологический процесс изготовления ремонтной втулки;
- результаты лабораторных и эксплуатационных испытаний;
- технико-экономическая оценка эффективности результатов исследования.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов подтверждается полученными данными при выполнении работ и экспериментальных исследований в ООО «Химкрофф», ООО «ВМ–Технологии», СПК «КОЛОС», ФГБОУ ВО «РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева», ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»» г. Москва, обработкой результатов по общепринятым методикам с использованием программ Microsoft Excel.

Публикации результатов исследований. По теме диссертационной работы опубликовано 4 печатных работы, в том числе три публикации – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 136 наименований, в том числе 8 – на иностранном языке, и приложений на 9 страницах. Работа изложена на 137 страницах машинописного текста, содержит 60 рисунков, 31 таблицу.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Анализ состояния парка сельскохозяйственной техники

Повышение производительности и надёжности техники, применяемой в агропромышленном секторе, является одной из важнейших задач увеличения эффективности производства сельхозпродукции.

Обеспеченность сельскохозяйственной техникой в стране остается на довольно низком уровне. Министерство сельского хозяйства оценивает дефицит самоходной техники, целом по стране, не менее чем в 100 тыс. единиц, преимущественно трактора и зерноуборочные комбайны.

В сборнике «Агропромышленный комплекс. Статистика Евразийского экономического союза», подготовленном Департаментом статистики Евразийской экономической комиссии, отмечается, что на конец 2018 года в российских хозяйствах было 231,6 тыс. тракторов, в 2019 их число снизилось до 225,9 тыс., в 2020 – до 222,6 тыс., в 2021 – до 217 тыс. На конец 2022 года в парках хозяйств было 214,9 тыс. тракторов, что на 7,2% меньше, чем в 2018 году. Приведенные Росстатом цифры производства сельскохозяйственных тракторов показывают, что в октябре 2023 года производство составило 759 штук в сравнении с сентябрем снижение составило 6,8%. Всего в 2023 году российские заводы произвели тракторов на 11,6% меньше, чем в 2022 (рисунок 1.1).

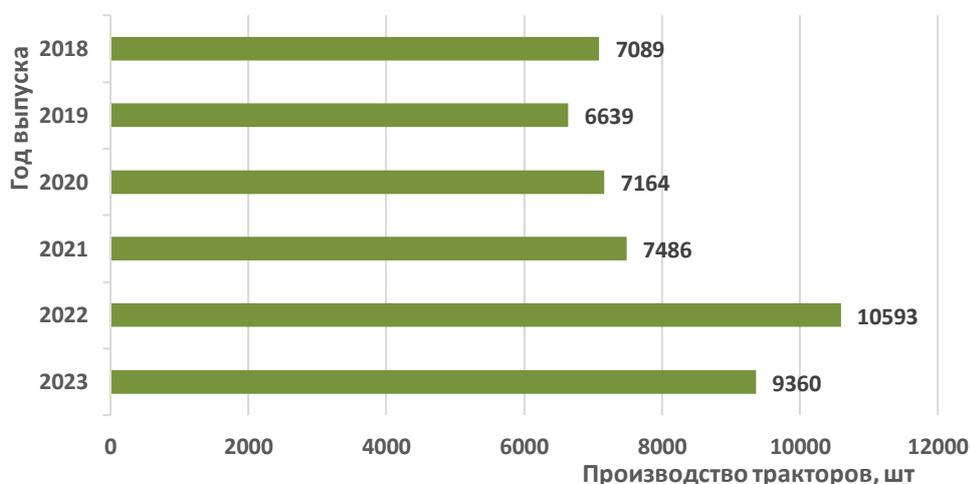


Рисунок 1.1 – Производство тракторов для сельского и лесного хозяйства в РФ, шт.

Согласно рисунку 1.2, в 2022 г. выпуск зерноуборочных комбайнов значительно сократился в сравнении с периодом 2018–2021 гг.

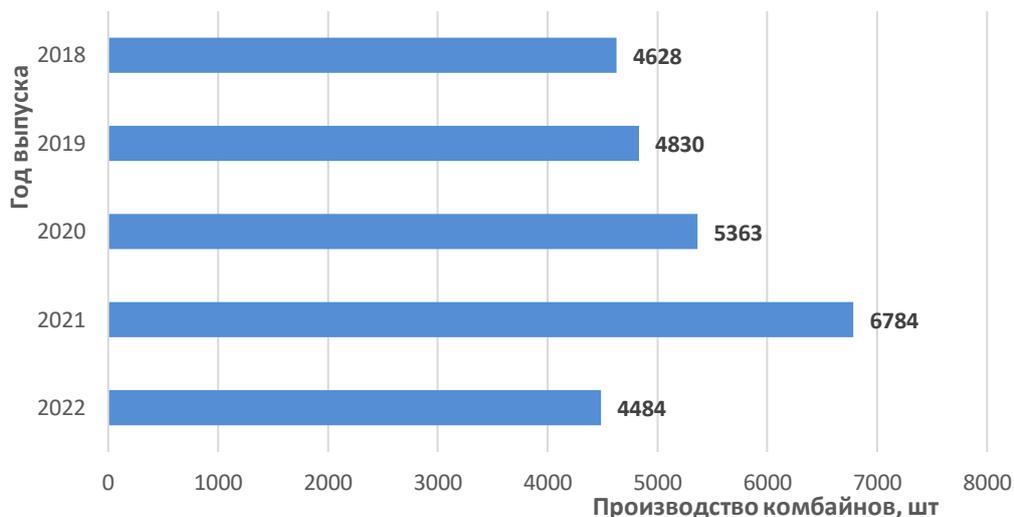


Рисунок 1.2 – Производство зерноуборочных комбайнов в РФ, шт.

С 1993 по 2019 год количество тракторов на тысячу гектаров пашни сократилось в 3,7 раза, а количество зерноуборочных комбайнов на тысячу гектаров посева сократилось в 3 раза (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Количество техники на тысячу гектаров

Такое сокращение привело к значительному увеличению нагрузки на каждую единицу сельскохозяйственной техники и повышению требований к надежности ее агрегатов и узлов.

Из техники, составляющей парк АПК, в эксплуатации свыше 10 лет находятся 59,6% тракторов, 45,3% зерноуборочных комбайнов, 44,3% кормоуборочных комбайнов. В эксплуатации от трёх до десяти лет находятся 26,7% тракторов, 35,6% зерноуборочных комбайнов, 39,8% кормоуборочных комбайнов (рисунок 1.4) [13].

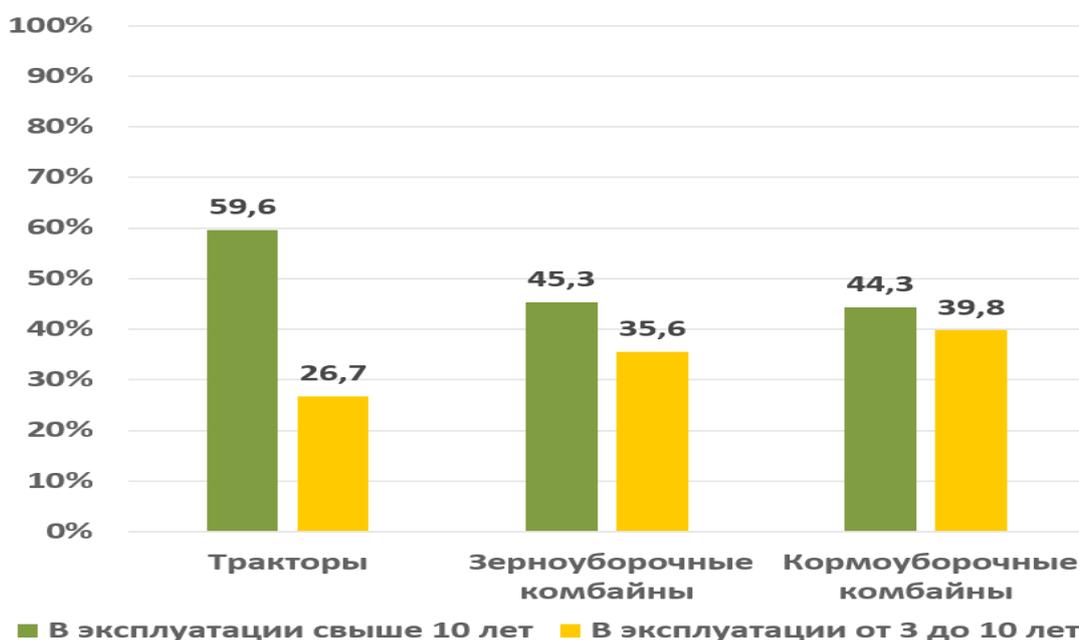


Рисунок 1.4 – Количество техники по годам выпуска

Эксплуатация старой сельскохозяйственной техники приводит к увеличению отказов, частоты ремонтов и повышению потребности в запасных частях. Средняя наработка на сложный отказ по результатам испытаний трактора К744 РЗ производства Петербургского тракторного завода составила 260 ч (по техническим условиям – 350 ч). Средняя наработка на сложный отказ по результатам испытаний комбайна КЗС–812 «Палессе GS 812» составила 33,3 часа при нормативе 100 часов. Средняя наработка на сложный отказ культиватора пропашного КПМ–5,6Т–01 составила 18,25 ч при нормативе 100 часов [3, 5, 6].

Результаты последних лет показали, что предприятия АПК начали активнее двигаться в направлении обновления своих парков техники. Анализ спроса

сельхозтехники говорит о том, что на первичном рынке наибольшей популярностью пользуются машины отечественного производства. По программам «Росагролизинга» в 2020 году среди уборочных машин самым востребованным стал комбайн «Ростсельмаша» ACROS–595 Plus, на его долю пришлось около 16% от всего объема поставок в данной категории. Среди тракторов малой мощности с долей в 21% лидирует «Беларус – 82.1» производства «МТЗ». Среди энергонасыщенных тракторов первым стал «Кировец» К–742 ПТЗ – 14% от общего объема в этой категории. Поставляемая «Росагролизингом» техника преимущественно имеет отечественное происхождение, исключение составляют машины, аналоги которых отсутствуют на территории России.

Повышение качества сельскохозяйственной техники и её комплектующих, уменьшение простоев техники, снижение затрат на эксплуатацию и ремонт – пути повышения конкурентоспособности отечественной техники.

1.2. Влияние условий эксплуатации сельскохозяйственной техники на работоспособность соединений «вал–уплотнение»

Условия работы сельскохозяйственных машин существенно отличаются от условий работы машин других отраслей (рисунок 1.5). К особенностям эксплуатации сельскохозяйственной техники относятся:

- сезонность использования в течение года;
- выполнение работ того или иного вида в строго определенные агротехнические сроки;
- работа и хранение в изменяющихся почвенно-климатических и биологических условиях;
- неравномерность нагрузок, возникновение динамических перегрузок, вызванных биологическими особенностями убираемых растений, рельефом местности, размерами полей, их засоренностью камнями и др.;
- минимальные затраты на техническое обслуживание и ремонт в период сезонных работ;

- ограничение допустимой массы сельскохозяйственных машин с точки зрения агротехнических требований;
- значительное содержание паров и газов в помещениях ферм и животноводческих комплексов, что в сочетании с высокой влажностью образует достаточно агрессивную среду.



Рисунок 1.5 – Работа сельскохозяйственной техники

При агрегатировании трактора навесными плугами наиболее часто используются пониженные передачи. Изменение глубины вспашки ведет к увеличению тягового усилия плуга и соответственно к росту коэффициента буксования, снижению скоростного режима, увеличению расхода топлива, повышению динамических нагрузок на трансмиссию и двигатель, увеличивая несоосность их валов с уплотнениями, что приводит к увеличению зазоров в уплотнительном соединении и повышенным утечкам (рисунок 1.6). При низкой частоте вращения вала скорость изнашивания в уплотнительном соединении возрастает в результате ухудшения гидродинамического режима смазки [9, 10, 11].

Практически все детали сельскохозяйственной техники работают в непосредственном контакте с почвой, оказывающей разрушающее действие на поверхности трения. Здесь и повышенная влажность, кислотность, абразивность,

щелочность и другие факторы, ускоряющие износ деталей и особенно трибосоединений.



Рисунок 1.6 – Внешний вид агрегатов сельскохозяйственной техники при нарушении герметичности уплотнений подшипниковых узлов

Большое количество деталей сельскохозяйственной техники по характеру выполняемой функции напрямую связаны с веществами, вызывающими абразивный износ. Даже при небольшом количестве присутствия в зоне трения абразивных частиц абразивное разрушение пар трения опережает другие виды поверхностного разрушения.

Основным источником попадания абразивных частиц в сопряжения машин является окружающая среда. При пахоте степень насыщения воздуха пылью составляет 0,05...1,2, при севе – 0,8...2,5 и при транспортных работах доходит до 2,1 г/м³ [12]. Пыль на 60 – 80% состоит из взвешенных частиц минералов. Большинство частиц имеют размеры от 5 до 120 мкм, т.е. соизмеримы с зазорами в сопряжениях сельскохозяйственной техники. Накопление пыли в смазочном материале до 0,25 % по массе приводит к отказу подшипников качения за 1000 ч при нормативной долговечности, в 10 раз большей [13].

Частицы пыли обладают микротвёрдостью (таблица 1.1) сопоставимой или превышающей значения этого показателя у стали. Поверхностная твердость рабочей поверхности вала в зоне контакта с уплотнением составляет 7000...8000

МПа, а микротвердость кварца – 10500...11300 МПа, оксида алюминия – 21000 МПа [14].

На рабочей поверхности вала в месте контакта с рабочей кромкой манжеты образуется канавка, которая образуется при попадании абразива в зону трения (рисунок 1.7), вызывая в дальнейшем течь смазочного материала, что приводит к выходу агрегата из строя [11, 15].



Рисунок 1.7 – Износ вала

Таблица 1.1 – Состав пыли

Состав пыли	Содержание, %	Микротвёрдость, МПа
Кварц	66...76	10500...11300
Оксид алюминия	11...14	21000
Оксид железа	11...14	9000
Оксид магния	1...2	6400
Оксид кальция	1...4	6000

Длительные простои, вызванные сезонностью использования сельскохозяйственной техники (рисунок 1.8), ведут к тому, что при запуске значительно увеличивается усилие страгивания, которое происходит при проворачивании вала относительно манжеты. Превышение допустимых нагрузок ведет к образованию микротрещин и последующему отслоению резины. В первые секунды работы в условия сухого или граничного трения резко увеличивается температура в зоне контакта манжеты и вала, что приводит к наволакиванию резины на вал (рисунок 1.9).

Длительный контакт с агрессивной средой, несоблюдение условий хранения приводит к химической коррозии поверхности вала в зоне контакта с уплотнением (рисунок 1.10).

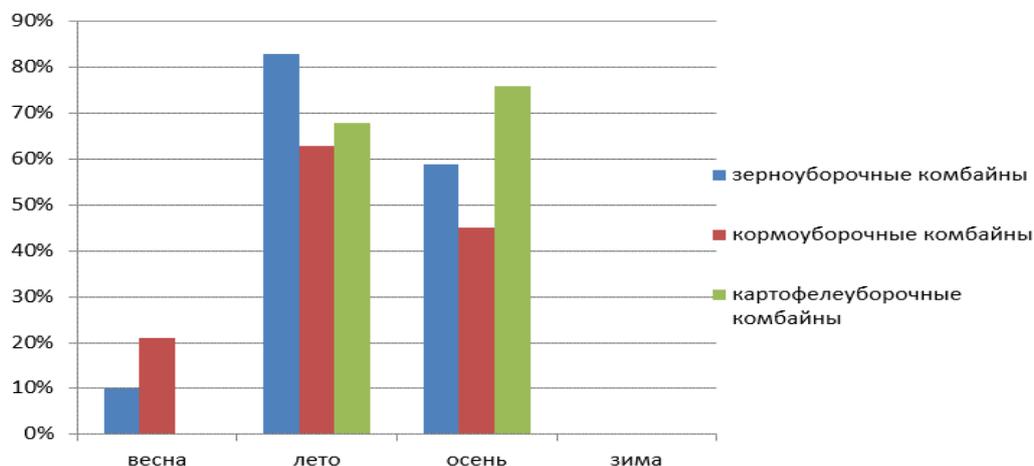


Рисунок 1.8 – Сезонное использование сельскохозяйственной техники



Рисунок 1.9 – Наволакивание резины на вал



Рисунок 1.10 – Коррозия рабочей поверхности вала в зоне контакта с манжетой

1.3. Уплотнения, применяемые в сельскохозяйственной технике

Срок службы агрегатов сельскохозяйственных машин напрямую зависит от долговечности уплотнительных устройств.

Повышение надежности уплотнительных устройств – важная задача, так как они предотвращают попадание загрязнений и влаги в агрегаты и узлы техники.

Вопросам повышения надежности техники, совершенствованию технического обслуживания и ремонта в сельскохозяйственном производстве посвящены работы А.С. Апатенко, В.И. Балабанова, В.М. Белова, Д.В. Варнакова, С.М. Гайдара, И.Г. Голубева, О.Н. Дидманидзе, А.С. Дорохова, М.Н. Ерохина, А.И. Иванова, С.П. Казанцева, П.А. Карепина, И.Н. Кравченко, В.М. Корнеева, О.А. Леонова, В.М. Михлина, В.С. Новикова, П.В. Новицкого, Н.С. Пасечникова, Е.А. Пучина, А.И. Селиванова, В.А. Семейкина, Н.Ф. Тельнова, С.К. Федорова, Н.М. Хмелевой, В.И. Черноиванова, Ю.А. Шамарина, В.М. Юдина и других авторов.

Исследованием конструкций уплотнительных узлов с целью их усовершенствования и повышения надежности работы занимались А.М. Баусов, А.И. Голубев, М.Н. Ерохин, С.П. Казанцев, Л.А. Кольцов, Л.А. Кондаков, О.А. Леонов, Я.Ф. Ракин, А.В. Чичинадзе и др.

Изучению процессов, происходящих в трибосоединениях и усовершенствованию материалов в соединении «вал–уплотнение», посвящены исследования А.С. Апатенко, В.А. Белого, В.К. Белякова, С.М. Гайдара, Д.Н. Гаркунова, М.В. Голуб, Р.А. Горелика, О.Н. Дидманидзе, Л.А. Кольцова, И.В. Крагельского, В.Н. Лозовского, В.Г. Назарова, Ю.А. Радина, В.П. Столярова, М.М. Тененбаума, М.М. Хрущова, В.С. Юровского и др.

Уплотнение – это устройство для разделения соприкасающихся в процессе эксплуатации изделия рабочих сред, предотвращения или уменьшения до допустимых пределов их утечки через подвижные или разъемные неподвижные соединения [17]. Условия эксплуатации, сроки службы, допустимый уровень утечек, характеристики рабочей и внешней среды и другие факторы влияют на эффективность использования уплотнительных устройств [18, 17, 19, 20].

В диссертации рассматриваются уплотнительные устройства, предназначенные для герметизации вращающихся валов (рисунок 1.11) [21, 22, 23].

Уплотнительные устройства для герметизации подшипниковых узлов вращающихся валов классифицируются на контактные и бесконтактные (рисунки 1.12, 1.13), а также существуют комбинированные уплотнительные устройства (рисунок 1.14).



Рисунок 1.11 – Классификация уплотнительных устройств

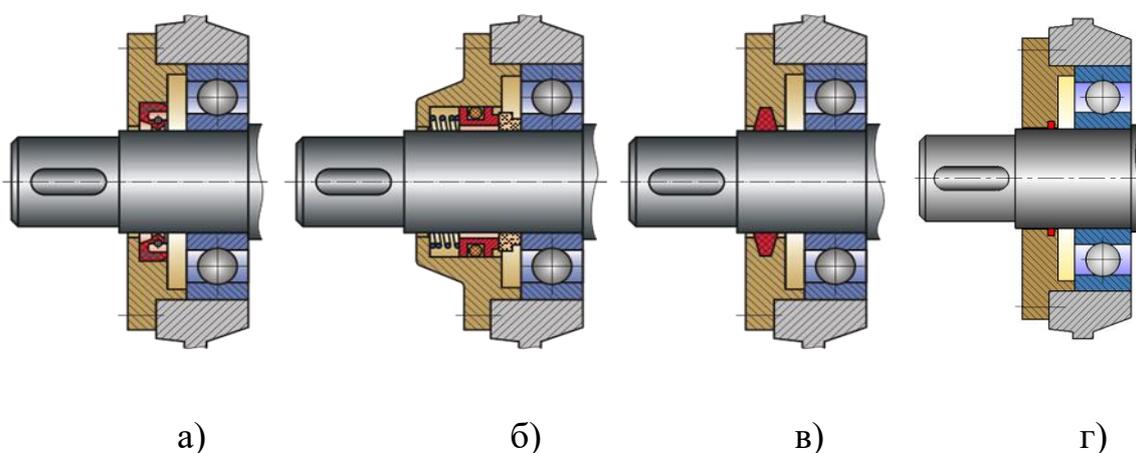


Рисунок 1.12 – Контактные уплотнительные устройства:
а) манжетные; б) торцовые; в) сальниковые; г) кольцевые

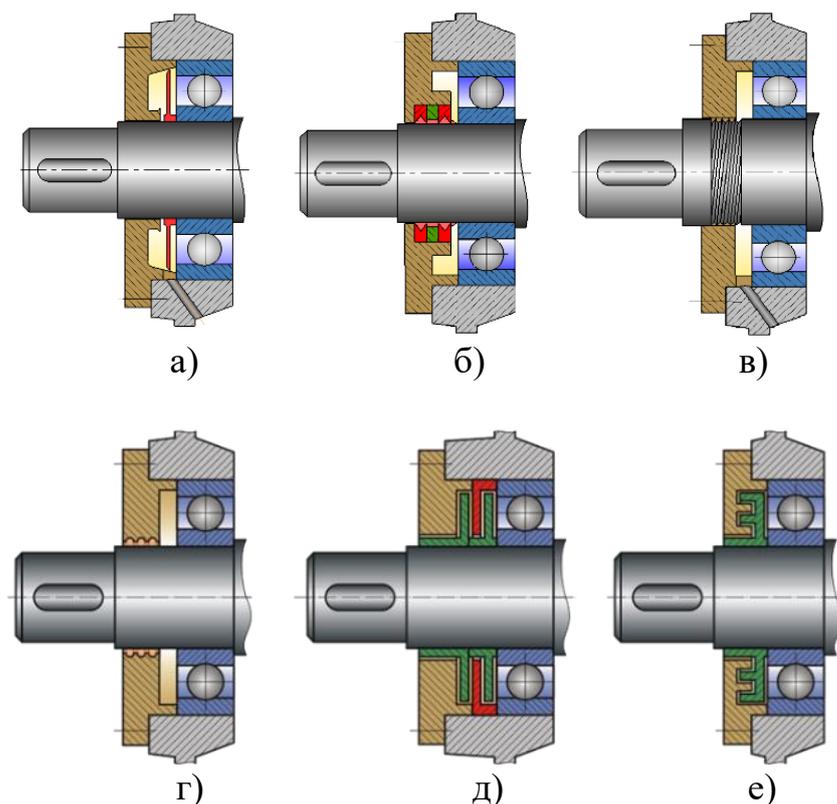


Рисунок 1.13 – Бесконтактные уплотнительные устройства:
 а) щелевые; б) лабиринтные осевые; в) лабиринтные радиальные;
 г) центробежные; д) магнитожидкостные; е) винтовые

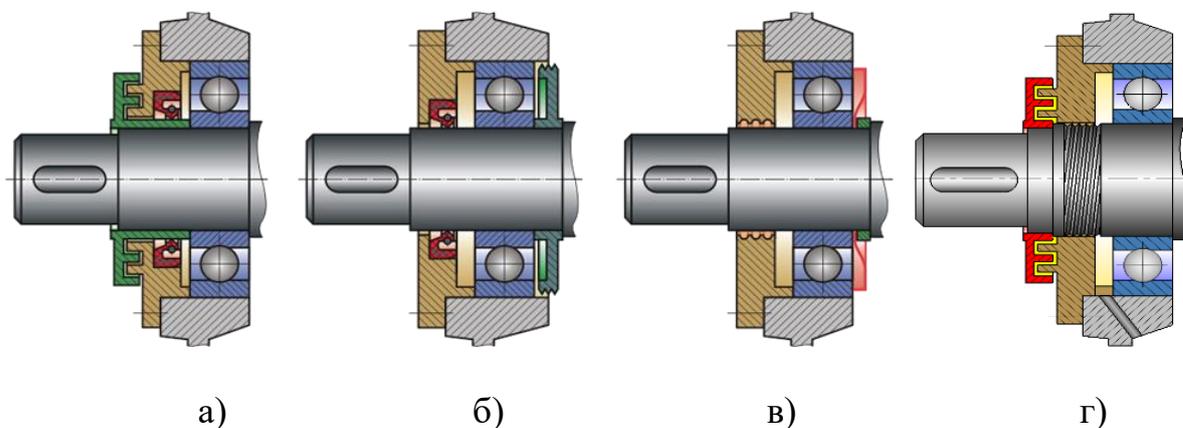


Рисунок 1.14 – Комбинированные уплотнительные устройства:
 а) манжетное с лабиринтным; б) манжетное с мазеудерживающим кольцом;
 в) щелевое с маслоотражательной шайбой; г) винтовое с лабиринтным

Наиболее распространённым типом уплотнительных устройств подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники (до 80 %) являются манжетные уплотнения (ГОСТ 8752 – 79) [24, 25, 26, 27, 28].

Металлический каркас обеспечивает плотную и герметичную посадку манжеты в корпусе механизма. Рабочая кромка манжеты прижимается к валу за

счёт браслетной пружины и естественной упругости резины, препятствуя вытеканию рабочей жидкости и попаданию в нее пыли и грязи.

Среди достоинств манжетных уплотнений выделяют:

- несложную конструкцию;
- компактные размеры и небольшой вес;
- отсутствие строгих требований к точности изготовления;
- простоту установки и снятия.

Возможности манжетных уплотнений ограничиваются характеристиками материала манжеты. Среди недостатков: ускоренное старение при высокой температуре, потеря эластичности при низкой температуре и крошение при больших скоростях скольжения в зоне контакта. Отсюда следуют высокие требования к твердости и шероховатости уплотняемой поверхности вала.

Для дальнейших исследований выбраны серийные манжеты из резины ИРП–1068 (типоразмер – 1.1–45х65–1) и валы (втулки) из стали 45, как наиболее распространенные (рисунок 1.15) [24, 112]

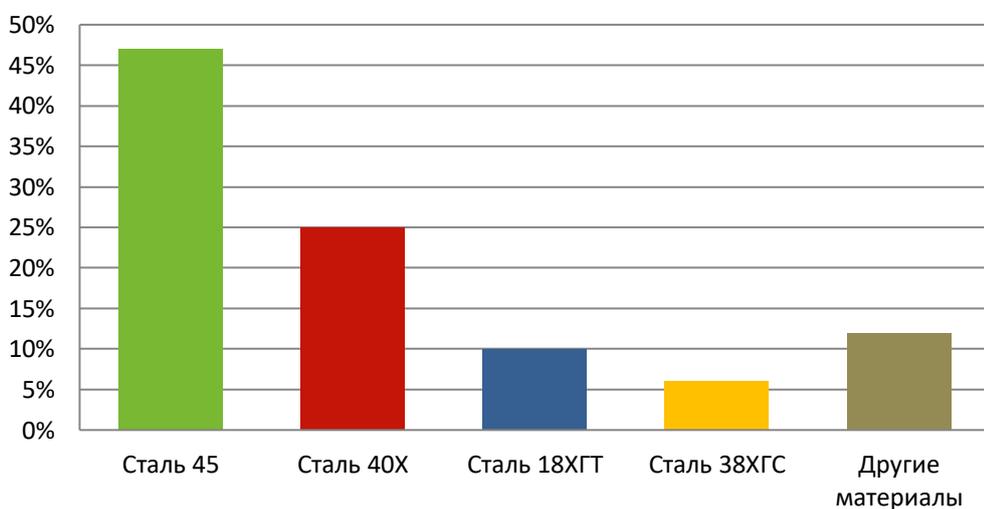


Рисунок 1.15 – Материалы для производства валов сельскохозяйственной техники

1.4. Дефекты в соединении «вал–манжета»

Качество соединений с манжетными уплотнениями должно обеспечиваться на этапах проектирования изготовления, производства и эксплуатации.

Наиболее распространёнными дефектами соединения «вал–манжета» являются:

- повреждение кромки манжеты при увеличении усилия страгивания;
- наволакивание резины на вал;
- неравномерный износ рабочей кромки манжеты вследствие отклонения от соосности и радиального биения вала;
- коррозионные повреждения вала в области контакта с манжетой;
- повреждения вала (износ, царапины, трещины).

Все это приводит к потере герметичности в соединении «вал–манжета», что снижает надежность эксплуатации машин, повышает расход смазочных материалов [29], ведет к разрушению узлов машины, повышая потребность в запасных частях. Нарушение уплотнений наблюдается у 44% тракторов в коробках передач, а у 31% происходят утечки в гидросистемах [30]. Утечки масла через уплотнения в энергонасыщенных тракторах составляют 23–28%, а в гидроагрегатах до 44% от общего числа отказов [32]. Утечки способствуют загрязнению сельскохозяйственных угодий и продукции.

При капитальном ремонте энергонасыщенных тракторов замене подлежат все уплотнения [31]. У валов редукторов в местах контакта с уплотнениями изнашиванию подвергается незначительный поверхностный слой металла (до 0,25 мм), но всего лишь 27% по диаметру валов входят в поле допуска изготовления, а 73% валов требуют восстановления (таблица 1.2) [8].

Таблица 1.2 – Показатели изношенных валов [8].

Параметр	Диаметр изношенных валов, d
Среднее значение, X	44,863
Среднее квадратическое отклонение, σ	0,062
Объем выборки, n	50
Коэффициент вариации, v	0,45
Закон распределения и вероятность согласия, %	ЗНР, 55
Количество годных деталей, %	27
Доверительные границы поля рассеяния при $\alpha=0,1$, мм	44,761–44,964
Максимальный износ, мм	0,25
Средний износ, мм	0,09

В ходе использования сельскохозяйственных машин реальный расход уплотнений оказывается в 2-3 раза выше установленных норм [14, 29].

И если замена манжеты не является трудоемкой операцией, то ремонт вала является трудоемким и дорогостоящим процессом.

1.5. Требования к поверхности вала в зоне контакта с уплотнением

Ключевыми конструктивными параметрами вала, определяющими долговечность узла трения и подлежащими восстановлению при ремонте, выступают шероховатость и твердость поверхности в области контакта с манжетой (ГОСТ 8752–79) [108].

Высокое качество обработки поверхности вала в зоне контакта с манжетой критически важно для корректной работы уплотнительного устройства.

Практика показывает, что шероховатость поверхностей валов под манжеты в большинстве случаев соответствует параметрам поверхностей, подготовленных для посадки подшипников качения. Это обусловлено технологической унификацией, когда для смежных участков вала применяют одинаковые режимы обработки, что приводит к типичному значению $Ra = 1,25$ мкм (рисунок 1.16). Исследования выявили, что рост шероховатости поверхности вала с 0,1 до 2 мкм приводит к увеличению коэффициента трения манжеты на 30%.



Рисунок 1.16 – Некачественная обработка поверхности вала под манжету

При анализе технических требований на капитальный ремонт сельскохозяйственной техники (таблица 1.3), разработанных в Федеральном научном агроинженерном центре ВИМ, выявлено, что допуски вала под манжету отличаются более чем в 30 раз, а основное отклонение вала находится в пределах от $-0,032$ до $+0,150$ мм [16]. Установленная твердость поверхности вала в зоне контакта с манжетой не соблюдается у 30...70% валов.

В работах [34, 35, 105] исследуется влияние наличия абразива в смазочном материале на износостойкость валов. В работе О.А. Леонова приводятся следующие факты: «износостойкость сырых валов в 1,5 – 2 раза выше закаленных, если нет абразива в зоне трения. По данным ГОСНИТИ, НАТИ, ВИСХОМ к концу межремонтного периода в трансмиссии тракторов содержание абразивных частиц достигает 2,5 – 3,5%, при среднем уровне 2%. В редукторах картофелеуборочных комбайнов концентрация абразива в масле сразу после ремонта составляет 0,5 – 1,5%, а через 3–4 года возрастает до 1,5 – 2,5% (в среднем 1,5%)» [105]. Рост концентрации абразива в масле требует увеличения твердости вала.

Таблица 1.3 – Нормированные и реальные параметры сопряженных с манжетами валов [8, 16, 33, 108]

Параметр	Нормированное значение	Реальное значение
Шероховатость поверхности Ra , мкм, при скорости скольжения: до 5 м/с	0,32...0,63	0,63...1,25
свыше 5 м/с	0,16...0,32	0,63...1,25
Твердость поверхности вала при скорости скольжения: до 5 м/с	HRC 30	HВ 200 – 260
свыше 5 м/с	HRC 50	HВ 200 – 260
Допуск отклонения	H10	Квалитет 6 –11

1.6. Методы восстановления рабочей поверхности валов в зоне контакта с уплотнением

В статье И.Ю. Игнаткина [37] говорится: «распространение получили следующие методы восстановления наружной цилиндрической поверхности вала:

- точение под ремонтный размер;

- различные виды напыления;
- электроконтактная приварка ленты;
- использование полимерных материалов;
- использование дополнительной ремонтной детали».

У каждого способа есть как преимущества, так и недостатки. При точении под ремонтный размер необходима последующая закалка поверхности, а оборудование для поверхностной закалки является не универсальным и дорогостоящим. Напыление позволяет получить функциональные покрытия с необходимыми свойствами, однако формируемое покрытие обладает низкой адгезионной прочностью. Электроконтактная приварка ленты имеет существенные ограничения по толщине восстанавливаемого слоя. Использование полимерных материалов холодного отверждения требует изготовления одноразовой оснастки [37].

Вышеперечисленные методы восстановления рабочей поверхности вала в зоне контакта с манжетой, за исключением использования дополнительной ремонтной детали (втулки), требуют замены узла при агрегатном методе ремонта, или ремонта агрегата с его разборкой, ремонтом или заменой изношенного вала. Если учесть, что в большинстве регионов Российской Федерации расстояния, преодолеваемые сервисными бригадами от центральной базы до места выполнения работ, в среднем составляет 200 км в одну сторону, то это ведет к длительному простоя сельскохозяйственной техники, находящейся в ожидании ремонта.

Средние сроки устранения неисправностей в период уборочных работ:

- в течение 1 суток, если не требуется разборка основных узлов;
- в течение 2 суток, если необходима разборка основных узлов [36].

Восстановление рабочих свойств наружной цилиндрической поверхности вала с применением тонкостенной ремонтной втулки является самым быстрым, эффективным и экономически выгодным способом [43].

Преимущества тонкостенных ремонтных втулок (далее ТРВ):

- восстановление оптимального натяга в соединении «вал–манжета» при изношенной манжете и выработке на валу;
- продление жизненного цикла уплотнительного узла;

- совместимость втулки с оригинальным уплотнением;
- отсутствие необходимости шлифования, металлизации или других видов обработки вала;
- снижение трудозатрат на ремонт техники, так как восстановление заданных параметров возможно без снятия и разборки агрегатов;
- возможность устранения неисправности в полевых условиях [44].

Задачей исследования является создание тонкостенной ремонтной втулки с параметрами рабочей поверхности не ниже указанных в ГОСТ8752–79.

В настоящее время ремонтные втулки для соединения «вал – манжета» выпускают несколько компаний: группа компаний SKF (Швеция), Dichtomatik (Германия) и др. Втулки, установленные на изношенный вал, прекрасно зарекомендовали себя при восстановлении герметичности уплотнительного соединения. Серьезным препятствием использования втулок иностранных государств является прекращение импорта, высокая стоимость. По состоянию на декабрь 2024 г. средняя стоимость втулки Speedi-Sleeve составляет 9547 руб.

1.7. Анализ работ по упрочнению стальных тонкостенных деталей

Увеличение долговечности соединения «вал–манжета» достигается за счет улучшения антифрикционных и износостойких характеристик контактирующих поверхностей. Одним из основных способов снижения износа в зоне трения является повышение твердости трущихся поверхностей. Для увеличения ресурса узлов и агрегатов, работающих в пылевом облаке, необходимо обеспечить твердость рабочей поверхности вала в зоне контакта с манжетой до значений, обеспечивающих повышение износостойкости тонкостенных втулок в условиях большой вероятности попадания в зону трения абразивных частиц с высокой микротвердостью (кварц 10500–11300 МПа, оксид алюминия 21000 МПа).

Абразивное изнашивание, представляющее собой механическое разрушение материала вследствие режущего или царапающего воздействия свободных или закрепленных частиц [111], остается преобладающим видом повреждений деталей

сельскохозяйственной техники. Современная наука пока не выработала единой теории механизма абразивного изнашивания.

Согласно В.Д. Кузнецову, абразивное изнашивание представляет собой совокупность множества элементарных процессов царапания [45].

М.М. Хрущов также рассматривает этот процесс как царапание металла абразивными зернами, большинство из которых оставляет пластически выдавленный след, а меньшая часть с благоприятно расположенными гранями снимает стружку [46].

И.В. Крагельский связывает основной механизм износа с многократным деформированием поверхностного слоя, приводящим к накоплению дефектов, образованию усталостных трещин и хрупкому отслоению частиц [47].

Этой же позиции придерживается П.Н. Львов. Его исследования показали: «даже при однократном воздействии абразивного зерна материал по краям образовавшейся царапины уже находится в состоянии, близком к разрушению (предразрушенным), что облегчает его удаление последующими абразивными частицами» [48]. Согласно этой точке зрения, ключевой механизм заключается в образовании вдавленных борозд.

А.К. Зайцев приходит к выводу: «абразивное изнашивание представляет из себя процесс резания, но с мельчайшей или витой стружкой – для вязких материалов и стружкой скалывания – для хрупких» [49].

В.И. Костецкий рассматривает абразивное изнашивание как особую форму резания с малыми сечениями срезаемой стружки [50].

В.Н. Ткачев выделяет три основных вида разрушения поверхностей при абразивном воздействии: микрорезание, передеформирование, коррозионно-механическое истирание. Согласно его концепции, «непосредственному отделению частиц материала предшествует критическое искажение кристаллической решетки и структуры металла в результате повторяющихся деформаций» [52].

В своих исследованиях С.П. Казанцев утверждает: «Механическое разрушение поверхностей деталей машинно-тракторных агрегатов происходит в результате микрорезания и царапания их абразивными частицами. Абразивное

изнашивание является наиболее распространенным и быстро протекающим видом изнашивания деталей сельскохозяйственной техники вследствие высокой степени концентрации контактных напряжений на локальных участках рабочих поверхностей деталей» [104].

Обзор научных исследований позволяет определить следующие ключевые факторы, влияющие на абразивный износ:

- морфология структурных компонентов сплава;
- характеристики абразивного материала, включая его твердость;
- геометрические параметры абразивных частиц;
- прочность фиксации абразивных зерен;
- скорость движения частиц;
- сила воздействия на абразивную частицу.

Для повышения устойчивости к механическому износу эффективными подходами являются:

- увеличение твердости контактирующих поверхностей за счет совершенствования методов упрочнения при производстве деталей;
- разработка упрочняющих технологий восстановления изношенных деталей [38];
- подбор материалов трущихся пар;
- улучшение качества обработки поверхностей.

В работе Т.В. Степановой говорится, что: «все существующие методы упрочнения подразделяются на 6 основных классов:

1. Упрочнение с созданием защитного слоя на поверхности:

- химическое осаждение (оксидирование, сульфидирование, фосфатирование, нанесение упрочняющих смазок, осаждение из газовой фазы);
- осаждение из паровой фазы (термическое испарение тугоплавких соединений, катодно-ионная бомбардировка, прямое и реактивное электронно-лучевое испарение, электронно-химическое испарение);
- электролитическое осаждение (хромирование, никелирование,

электрофорез, никельфосфатирование, борирование, борохромирование, хромофосфатирование);

- напыление износостойких соединений (плазменное напыление порошковых материалов, детонационное напыление, электродуговое напыление, лазерное напыление, вихревое напыление, индукционное припекание порошковых материалов).

2. Упрочнение с изменением химического состава поверхностного слоя:

- диффузионное насыщение (азотирование, борирование, нитроцементация и т.п.)

- химическое и физико-химическое воздействие (химическая обработка, ионная имплантация, электроискровая обработка и т.д.).

3. Упрочнение с изменением структуры поверхностного слоя:

- физико-термическая обработка (лазерная закалка, плазменная закалка);

- электрофизическая обработка (электроконтактная, электроэрозионная, магнитная обработка);

- механическая обработка (упрочнение вибрацией, фрикционно-упрочняющая обработка, дробеструйная, термомеханическая, электромеханическая);

- наплавка легированным элементом (газовым пламенем, электрической дугой, плазмой, лазерным лучом, пучком ионов и т.д.).

4. Упрочнение с изменением энергетического запаса поверхностного слоя:

- обработка в магнитном поле (терромагнитная обработка, импульсным магнитным полем, магнитным полем);

- обработка в электрическом поле.

5. Упрочнение с изменением микрогеометрии поверхности и наклепом:

- механическая обработка (точение, шлифование, сверхскоростное резание);

- пластическое деформирование (накатывание, обкатывание, раскатывание, выглаживание, вибронакатывание, вибровыглаживание,

калибрование, центробежно-ударное упрочнение, виброударное и т.д.);

– комбинированные методы (анодно-механическая, поверхностное легирование с выглаживанием, резание с воздействием ультразвуковых колебаний, магнитно-абразивная обработка и т.д.).

6. Упрочнение с изменением структуры всего объема металла:

– термообработка при положительных температурах (закалка, отпуск, улучшение, закалка ТВЧ, нормализация, термомагнитная обработка);

– криогенная обработка (закалка с обработкой холодом, термоциклирование)» [51].

Рассмотрим основные методы упрочнения поверхностей трения, обеспечивающие повышенную твердость металла (таблица 1.4) [38, 39, 40, 41, 42].

Таблица 1.4 – Методы упрочнения поверхностей трения валов (втулок)

Метод	Микротвердость поверхности, МПа	Особенности
Борирование	18000...23000	Увеличение размера
Гальваническое хромирование	До 13000	Незначительное увеличение размера
Электроконтактное упрочнение	До 31700	Увеличение размера
Газотермическое нанесение покрытий	До 30000	Увеличение размера
Плазменное легирование	8000...20000	Возможны деформации
Диффузионное легирование	До 32000	Увеличение размера
Лазерное легирование	До 21000	Не изменяется
Лазерное легирование + азотирование	10000...21000	Зависит от режимов азотирования
Электроискровое легирование	6000...32000	Не изменяется
CVD-метод	До 32000	Увеличение размера
PVD - метод	До 32000	Незначительное увеличение размера

Борирование – технология поверхностного упрочнения, заключающаяся в насыщении поверхностей деталей бором, ведущая к изменению физико-механических характеристик: твердость, термостойкость, усталостная прочность и другие [54]. Преимущества борированного слоя: высокая твердость (достигающая

18000...23000 МПа) и устойчивость к коррозии. Толщина слоя редко превышает 0,15 мм.

Основные методы борирования:

- электролизное;
- жидкостное;
- газовое;
- борирование в твердой среде.

Процессы борирования проходят при температуре 850...1000 °С с выдержкой от 2 до 10 ч, в зависимости от выбранного метода.

Борированные стали демонстрируют повышенную устойчивость к износу при различных видах воздействия: скольжении, абразивном и гидроабразивном износе, фреттинг-коррозии, а также в условиях экстремальных температур и агрессивных сред.

Среди ключевых ограничений борирования выделяют: деформацию деталей [55], ухудшение качества поверхности (обычно на один класс), повышенную хрупкость покрытий [54].

Гальваническое хромирование деталей используется для защиты от коррозии, уменьшения износа и предотвращения налипания на поверхность контактирующих материалов.

Низкий коэффициент трения, высокая твердость (до 16000 МПа), износостойкость (повышение износостойкости по отношению к конструкционным сталям в 2...20 раз), химическая стойкость обеспечивают широкое промышленное использование хромовых покрытий [53].

Использование гальванического способа нанесения покрытий на практике обусловлено:

- относительной простотой процесса;
- экономичностью;
- доступностью контроля и автоматизации;
- гибкостью в регулировании свойств, толщины и состава осаждаемого сплава;

– возможностью восстановления и замены покрытий.

Электроконтактное нанесение покрытий – метод формирования покрытия на поверхности детали с помощью импульсов электрического тока. Процесс электроконтактного нанесения покрытий реализуется при силе тока 15–30 кА, напряжении 1–6 В и давлении до 100 МПа. Получаемые таким способом порошковые покрытия обладают высокими физико-механическими характеристиками (прочность сцепления 150–300 МПа, пористость менее 10%) [38].

В таблице 1.5 приведены характеристики некоторых износостойких материалов, применяемых при получении электроконтактных порошковых покрытий [69].

Таблица 1.5 – Характеристика износостойких материалов

Параметр	Порошковый материал			
	Феррохром углеродистый ФХ–800	Карбид хрома Cr_3C_2	Карбид титана TiC	Окись алюминия Al_2O_3
Микротвердость, МПа	18000	18000	31700	20000

Газотермическое напыление – процесс нагрева, диспергирования и переноса конденсированных частиц распыляемого материала газовым или плазменным потоком для формирования на подложке слоя нужного материала. При газопламенном напылении используется теплота, выделяющаяся при горении смеси «горючий газ – кислород». Электродуговое напыление основано на использовании теплоты электрической дуги.

Газотермическое напыление порошков, за счет применения различных порошковых композиций, позволяет управлять составом, структурой и свойствами покрытий [63].

Плазменно-дуговой метод нанесения покрытий основан на создании поверхностного слоя из порошковых частиц, которые получают тепловую и кинетическую энергию при взаимодействии со струей дуговой плазмы. Плазма разогревается до 5000...5500 °С и движется со скоростью 1000–1500 м/с, расплавляя и ускоряя частицы до 50–200 м/с. При этом температура

обрабатываемой поверхности не превышает 200°C, что минимизирует деформации.

Плазменно-дуговой способ нанесения покрытий в открытых условиях имеет ряд существенных недостатков:

- слабая адгезия покрытий к основе (10...50 МПа при испытаниях на нормальный отрыв);
- высокая пористость получаемых покрытий (2... 15%);
- снижение усталостной прочности деталей на 10...40 %;
- низкий коэффициент полезного использования преобразования энергии плазмы в нагрев порошка (2...8 %);
- высокий уровень шума (110...130 дБ) и излучения;
- дороговизна оборудования и его стационарность, ограниченный срок службы плазмотронов;
- выделение дыма и аэрозолей во время напыления, что требует установки мощных систем вентиляции.

Шероховатость получаемых покрытий варьируется в широком диапазоне - от 40 до 500 мкм [65].

При газопламенном нанесении покрытий частицы порошка получают тепловую и кинетическую энергию за счет взаимодействия с пламенем, образующимся при сгорании смеси горючего газа с кислородом. При использовании ацетилена температура пламени достигает 3200 °С, а скорость истечения газов составляет 150...160 м/с. Частицы порошка, попадая в струю, расплавляются или приобретают высокую пластичность, одновременно ускоряясь до 20...80 м/с.

К недостаткам газопламенного способа напыления покрытий из порошковых материалов относятся:

- слабая адгезия покрытий к основе (5...25 МПа при испытании на нормальный отрыв), требующая предварительной абразивно-струйной обработки поверхности;
- высокая пористость покрытий (5...25%), что исключает использование изделий в коррозионных средах без дополнительной обработки.

Разновидностью этого метода является детонационное напыление, где частицы ускоряются за счет энергии взрывной волны. Скорость детонации достигает 2000–4000 м/с при температурах 2200–5500 °С, что позволяет частицам развивать скорость 600...1000 м/с [64]. Покрытия имеют толщину 45...220 мкм, шероховатость $Ra = 2,5...7$ мкм [74].

Основные недостатки детонационного напыления:

- ограничения по материалам, склонным к взаимодействию с компонентами детонационной среды (CO_2 , CO , H_2O и др.);
- невозможность работы с недостаточно жёсткими деталями из-за мощных ударных нагрузок от детонационной струи;
- ограничения по твердости напыляемой поверхности (не должна быть выше HRC60).

Газотермические покрытия сразу после нанесения не обеспечивают требуемой точности геометрии, равномерной шероховатости и монолитности структуры. Это исключает их применение для точных деталей без последующей обработки - механической, термической, пропиткой или другими методами.

Плазменное упрочнение поверхности осуществляется двумя основными способами: обработкой материалов в твердом состоянии и с расплавлением поверхностного слоя [68].

Процесс закалки включает нагрев до критической температуры (не ниже 750 °С) с последующим быстрым охлаждением, что повышает твердость стальных и чугунных деталей в 2–3 раза – с 20–25 до 50–65 HRC.

Исследования показывают, что даже незначительное легирование хромом (в сталях 30X, 40X, 50X и 30, 45, 50) приводит к заметному росту микротвердости. Легированные конструкционные стали также характеризуются меньшей критической скоростью охлаждения и вследствие этого лучше прокаливаются. Содержание легирующих элементов в стали напрямую влияет на ее способность к прокаливанию [68].

Плазменное легирование представляет собой быстрый химико-термический процесс, при котором поверхность насыщается углеродом, азотом или другими

элементами [65]. Глубина легированного слоя варьируется от 0,2 до 0,5 мм в зависимости от условий обработки [68].

Плазменное азотирование формирует поверхности с повышенной твердостью, износостойкостью и коррозионной устойчивостью.

Образующиеся в процессе азотирования легированных сталей нитриды алюминия, титана, ванадия, хрома, молибдена и вольфрама значительно повышают твердость упрочненной поверхности [65].

Плазменное борирование выполняется с использованием активных паст на основе порошка карбида бора. Микротвердость борида FeB составляет 18000...20100 МПа, а Fe₃B – 15000...16500 МПа [68]. Одним из серьезных недостатков данного способа упрочнения является образование дефектов на обрабатываемых поверхностях. Наиболее распространенными из них являются продольные и поперечные трещины, которые располагаются в упрочненном слое и переходной зоне [65].

Диффузионная металлизация заключается в диффузионном насыщении поверхностных слоёв деталей из металлов и сплавов тугоплавкими металлами (хромом, титаном, никелем и др.), что приводит к изменению их химического состава, структуры и свойств поверхности изделий. Ключевым фактором формирования карбидных и нитридных покрытий служит повышенное содержание углерода в сталях или азота в азотированных сплавах.

Получаемые диффузионные покрытия обладают исключительной устойчивостью к износу, сопротивлением задирам, антикоррозионными свойствами и прочностью сцепления с основой.

Поверхностная твердость диффузионных покрытий составляет 16000...32000 МПа [56]. Важным достоинством метода является возможность обработки поверхностей сложной конфигурации и труднодоступных участков деталей.

Использование обычных углеродистых сталей с последующим диффузионным упрочнением часто позволяет отказаться от высоколегированных сталей. Существенными недостатками технологии являются: высокие температуры (1000–1200 °С и более) и длительный процесс упрочнения (6...10 ч), что вызывает существенные изменения как макро-, так и микрогеометрии деталей.

Термическое упрочнение металлов и сплавов лазерным излучением происходит за счёт локального нагрева поверхности излучением и охлаждения этого участка со сверхкритической скоростью в связи с отводом теплоты во внутренние слои металла [38, 55].

Суть процесса заключается в образовании аустенитной структуры при нагреве и её преобразовании в мартенсит при охлаждении [58].

Важно отметить, что при лазерном упрочнении разные слои материала прогреваются до неодинаковых температур, из-за чего зона обработки приобретает слоистую структуру при ее последующем превращении в мартенсит на этапе охлаждения [59].

Лазерное поверхностное легирование – это процесс насыщения детали неметаллическими или металлическими элементами, такими как углерод, азот, кремний, бор. Для этого наносят специальные пасты или обмазки, которые затем расплавляют импульсным или непрерывным лазерным излучением. Глубина легированного слоя обычно составляет 0,3 – 0,4 мм при импульсной обработке и 0,3 – 1,0 мм при непрерывном воздействии [59].

Микротвердость поверхности после лазерного борирования может достигать до 21000 МПа, при силицировании – до 15000 МПа, а при цементации – до 14000 МПа.

При обработке сталей карбидом кремния методом лазерного легирования достигается твердость до 17000 МПа в зоне воздействия.

В таблице 1.6 приведены средние показатели твердости для сталей 20 и 40Х после комбинированной обработки с разными легирующими добавками [38].

Таблица 1.6 – Средние значения микротвердости при комбинированной обработке

Материал образца	Сталь 20	Сталь 40Х
Легирующий элемент	Микротвердость, МПа	
V	17800	16900
W	11000	12100
Cr	15900	15800
Mo	10500	10000
Al	20000	16000

Электроискровое легирование металлических поверхностей использует эффект электрической эрозии и полярного переноса материала анода (инструмента) на катод (деталь) при протекании импульсных разрядов в газовой среде структуры и ее последующем превращении в мартенсит на этапе охлаждения [60].

Легирование стальных подложек тугоплавкими соединениями, такими как карбиды, значительно увеличивает твердость поверхностного слоя. Данные по микротвердости покрытий на стали 45 после электроискрового легирования приведены в таблице 1.7 [61].

Таблица 1.7 - Микротвердость покрытий

	Ti	ZrC	NbC	Cr ₃ C ₂	Mo ₂ C	WC
Микротвердость, МПа	30400	26500	16600	16000	14000	32000

Твердость распределяется неравномерно по глубине слоя, достигая максимума в верхней зоне (обычно белом слое). Твердость постепенно снижается по мере продвижения вглубь материала, пока не сравняется с показателями исходного материала [60].

При увеличении глубины легированного слоя в нем резко нарастают остаточные напряжения, создающие значительные нагрузки на границе раздела, что провоцирует образование трещин.

Шероховатость обработанной поверхности:

- 20–25 мкм при чистовых режимах;
- 80–160 мкм при грубой обработке [62].

Недостатками электроискрового легирования являются высокая шероховатость и пористость, а также низкая скорость обработки (< 10...20 см²/мин) [60].

Химическая паровая металлизация (CVD-процессы) – метод основан на способности определенных веществ выделять чистые металлы или их соединения под воздействием энергии. В качестве таких веществ могут выступать неорганические соединения, например галогены, и металлоорганические соединения, содержащие связь металл – углерод, например, карбонилы металлов [72, 73].

Основные преимущества CVD-метода:

- плотные (практически беспористые) покрытия;
- низкая шероховатость поверхности $Ra = 0,32...2,5$ мкм;
- возможность равномерного покрытия сложных поверхностей за счет равномерного распределения паров металлоорганических соединений;
- высокая микротвердость покрытий (до 32000 МПа);
- прочное сцепление с подложкой (до 260 МПа) [72, 73].

При **физическом осаждении из паровой фазы (PVD-метод)** материал покрытия переходит из твердого состояния в газовую фазу в результате испарения под воздействием тепловой энергии или в результате распыления за счет кинетической энергии столкновения частиц материала [70].

Характер распределения энергии и интенсивность потока частиц зависят от выбранного метода нанесения, условий процесса и конфигурации источника частиц.

PVD-покрытия формируются при относительно низких температурах (как правило, не превышающих 500 °С), что минимизирует ограничения по совместимости с различными материалами подложки. Все этапы PVD осуществляются в вакууме или в среде рабочего газа (например, Ar, N₂, C₂H₂) при пониженном давлении.

При нанесении покрытий методом PVD переход материала из твердого состояния в газообразное реализуется при помощи различных физических процессов, которые делятся на две большие группы:

1. Процессы, использующие испарение (за счет резистивного сопротивления; индукционного нагрева; электронно-лучевого пучка; низковольтной дуги; полого катода; лазерного луча). Эти процессы могут сопровождаться ионизацией, протекать в реакционной газовой среде или без нее, с применением смещающего напряжения или без него.

2. Процессы, использующие распыление (диодное, магнетронное). Эти процессы могут осуществляться как с постоянным, так и с высокочастотным током, в присутствии реакционного газа или в его отсутствии, с использованием

смещающего напряжения или без него, а также с дополнительным воздействием магнитного поля (несбалансированного или замкнутого) или без такого воздействия.

Для нанесения покрытий методом PVD чаще всего применяют один из трех основных способов:

1. Электронно-лучевое испарение;
2. Вакуумно-дуговое испарение;
3. Магнетронное испарение.

Эти технологии обеспечивают [122]:

- высокую скорость осаждения при рабочем напряжении 600–800 В и давлении газа 0,5–10 Па;
- высокую адгезию покрытия к основе;
- предотвращение перегрева обрабатываемой поверхности;
- минимальное загрязнение формируемых слоев;
- возможность получения равномерных по толщине пленок на обширных площадях подложек;
- возможность нанесения плотных покрытий из тугоплавких химических соединений [71];
- тонкий слой (1,5–6 мкм).

Покрытия, полученные методом физического осаждения из паровой фазы (PVD), отличаются рядом важных преимуществ, обуславливающих их широкое применение:

- повышенная прочность и износостойкость (даже простые бинарные нитридные пленки [125, 126, 127, 128], такие как TiN, CrN, ZrN, демонстрируют исключительную твердость, вплоть до сверхтвердых значений, обладают высокой устойчивостью к образованию трещин и лучше выдерживают ударные нагрузки, что увеличивает срок службы основного материала и его сопротивляемость износу) [124];

- коррозионная стойкость (PVD-покрытия создают надежный защитный слой, предотвращающий окисление и коррозию подложки даже в экстремальных условиях);

- низкое трение (благодаря отличным антифрикционным свойствам и низкому коэффициенту трения, эти покрытия уменьшают износ деталей и повышают энергоэффективность механических узлов) [129].

- экологичность (технология PVD считается более безопасной для окружающей среды, так как генерирует меньше отходов и требует минимального использования токсичных веществ) [123].

Выбранный способ упрочнения тонкостенной ремонтной втулки должен обеспечить:

- сохранение формы втулки (исключить коробление детали);
- минимальное изменение шероховатости поверхности втулки (обеспечить выполнение требований ГОСТ 8752–79);
- минимальную толщину упрочняющего покрытия (исключить значительное увеличение толщины втулки);
- качество и твердость рабочей поверхности в зоне контакта с манжетой.

Анализ методов поверхностного упрочнения деталей показывает, что для тонкостенной втулки не пригодны:

- высокотемпературные ($t > 450^{\circ}\text{C}$) и другие методы упрочнения из-за опасности деформации (короблению) тонкостенной детали,
- методы, значительно повышающие шероховатость, ведущие к образованию дефектов рельефа и структуры (слоистость, пористость) поверхности;
- методы, приводящие к значительному увеличению толщины втулки.

Для упрочнения рабочей поверхности тонкостенной втулки были выбраны:

- электролитическое покрытие на основе хрома (температура нанесения в интервале $45\text{--}55^{\circ}\text{C}$, обеспечивающее микротвердость $11000\text{--}16000$ МПа);
- физическое осаждение (PVD) (температура нанесения в интервале $200\text{--}450^{\circ}\text{C}$, обеспечивающее микротвердость более 21000 МПа) [44].

1.8. Упрочнение рабочей поверхности тонкостенной ремонтной втулки хромированием

При износостойком хромировании особое внимание уделяется мероприятиям, обеспечивающим равномерность покрытия, что особенно важно из-за значительной толщины слоя и ограниченной рассеивающей способности электролитов для хромирования [94 – 98]. Технологический процесс хромирования включает несколько этапов: подготовку деталей, нанесение покрытия и финишную обработку.

Подготовка деталей перед хромированием состоит из следующих этапов:

- предварительное обезжиривание для удаления органических загрязнений с использованием растворителей, щелочных растворов или моющих составов;
- изоляция участков, не подлежащих хромированию;
- крепление деталей на подвески;
- обезжиривание;
- промывка в воде;
- активация поверхности;
- размещение деталей в гальванической ванне.

Участки деталей, которые не должны подвергаться хромированию, а также подвески (за исключением мест контактов) покрываются изоляционными материалами. Эти материалы обладают химической стойкостью и способны выдерживать катодную поляризацию в хромовом электролите при температуре 50–70°С в течение продолжительного времени без разрушения. Для изоляции внутренних участков втулки применяется оправка, состоящая из стального цилиндра и прокладок, исключающих попадание электролита внутрь конструкции (рисунок 1.17).

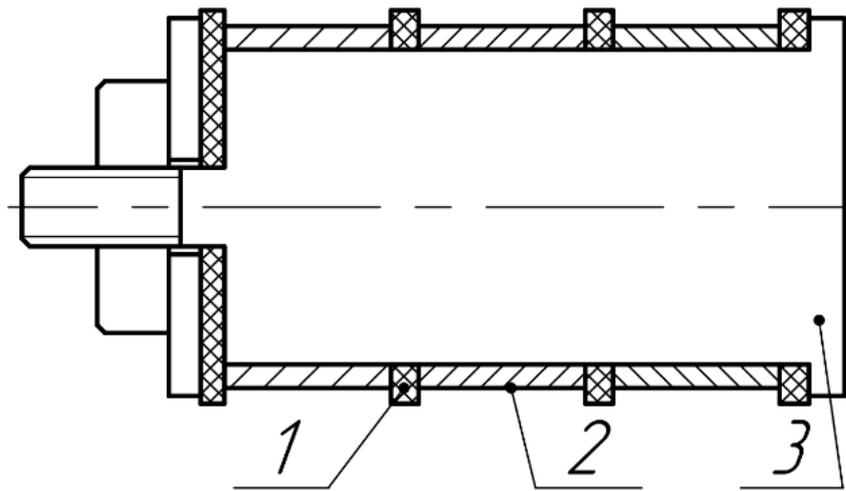


Рисунок 1.17 – Приспособление для хромирования ТРВ: 1 – химически стойкая прокладка; 2 – ТРВ; 3 – оправка

Подвесные устройства должны обеспечить надежный подвод тока к деталям и способствовать равномерному распределению тока по её поверхности. При хромировании наружных поверхностей важно исключить взаимное экранирование деталей. Все элементы подвески, кроме контактных зон и защитных катодов, должны быть изолированы для предотвращения утечки тока.

Для обезжиривания рекомендуется использовать электролитический раствор следующего состава: гидроксид натрия (NaOH) – 30...50 г/л; карбонат натрия (Na_2CO_3) – 25...30 г/л и силикат натрия (Na_2SiO_3) – 10...20 г/л. Температура электролита – 60...70°, плотность тока – 5...15 А/дм². Время выдержки на катоде – 2...3 мин, а на аноде – 1...2 мин. После обезжиривания детали промывают горячей (60...80°), а затем холодной водой. Обезжиривание считается законченным, если после промывки вода равномерно смачивает поверхность.

Перед помещением деталей в гальваническую ванну выполняется декапирование для устранения тонких оксидных плёнок. Эта операция занимает 30...90 с при плотности тока 25–40 А/дм². Оптимальная температура электролита должна поддерживаться в диапазоне 55–60 °С.

Общая схема установки для хромирования представлена на рисунке 1.18.

Рекомендуемое расстояние между анодами и обрабатываемыми деталями составляет 30–35 мм, максимально допустимое – не более 50 мм.

Детали должны располагаться на расстоянии:

- от дна ванны не менее 100 мм;
- от поверхности электролита не менее 50 мм.

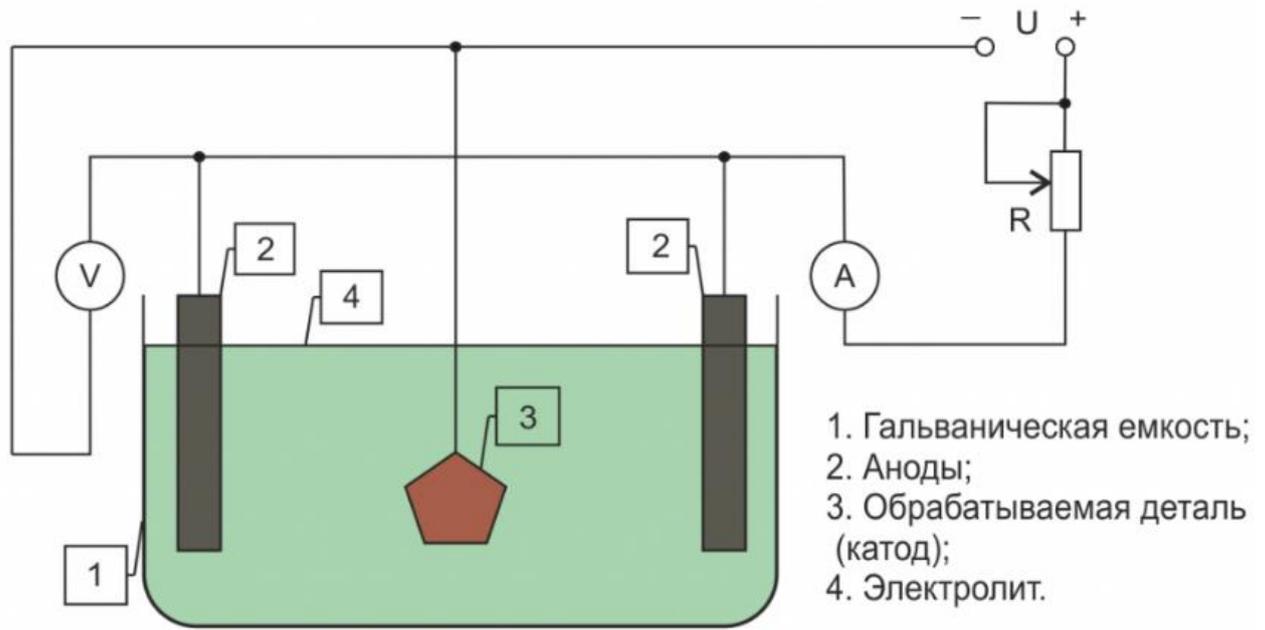


Рисунок 1.18 – Схема установки для хромирования

Уровень электролита должен быть ниже верхних кромок ванны на 100...150 мм. При размещении деталей в ванне важно обеспечить симметричное расположение анодов относительно катодов, что способствует равномерному осаждению хромового слоя по всей поверхности.

Перед началом электролиза детали необходимо довести до температуры электролита. Для этого их помещают в хромировочную ванну и выдерживают без подачи тока 5–6 минут, после чего дают максимальный ток согласно технологическому режиму на 1–2 минуты, а затем плавно снижают до рабочего значения. Такой подход обеспечивает осаждение хрома в углублениях детали.

Продолжительность хромирования рассчитывается исходя из требуемой толщины покрытия и скорости его наращивания при выбранных параметрах процесса.

Фактическая продолжительность процесса корректируется на практике с учётом потерь тока на защитные катоды, утечки через изоляцию и неравномерность покрытия. Катодная плотность тока не всегда прямо влияет на производительность ванны. Повышение плотности ускоряет процесс, но одновременно снижает допустимую загрузку деталей, если при стандартных параметрах источник тока работает на полную мощность.

Характеристики хромового покрытия и сам процесс осаждения зависят от режима электролиза – плотности тока и температуры раствора. Диаграмма, показывающая соотношение этих параметров (рисунок 1.19), наглядно демонстрирует границы получения серых, блестящих и молочных покрытий.

Участок восстановления деталей хромированием изображен на рисунке 1.20.

Для питания используются выпрямители или низковольтные генераторы. Гальванические ванны изготавливаются из стального листа толщиной 4...5 мм. Ванны для промывки и обезжиривания не нуждаются в облицовке, тогда как внутреннюю часть хромировочной ванны покрывают свинцом.

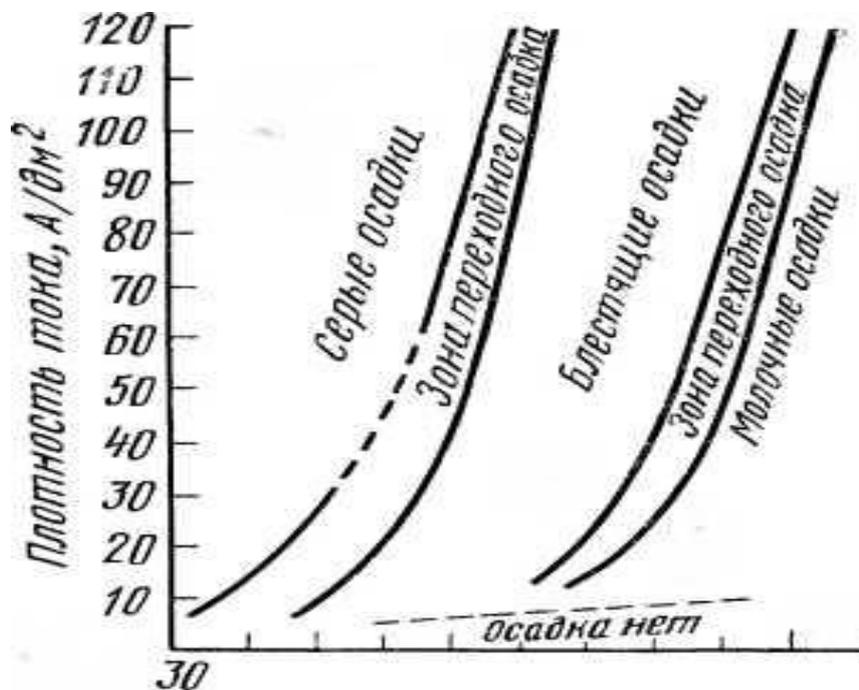


Рисунок 1.19 – Зоны хромовых осадков

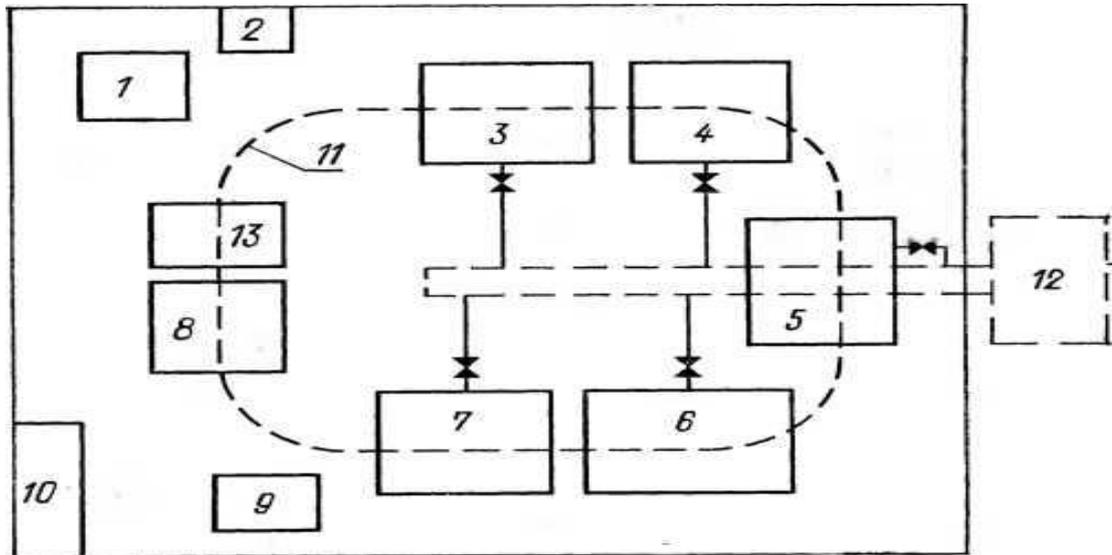


Рисунок 1.20 – Расположение оборудования на участке восстановления деталей хромированием: 1 – выпрямитель; 2 – электроцит; 3 – ванна для электрохимического обезжиривания; 4 – ванна для горячей промывки; 5 – ванна для холодной промывки; 6 – ванна для декапирования; 7 – ванна для хромирования; 8 – ванна для улавливания электролита; 9 – шкаф сушильный; 10 – стеллаж ремфонда; 11 – электротельфер; 12 – сборник-нейтрализатор; 13 – стол для монтажа и демонтажа

По завершении процесса хромирования детали сначала промывают в ванне с непроточной водой для удаления остатков электролита, затем последовательно в холодной и горячей проточной воде, после чего их высушивают. В зависимости от технических требований к покрытию и материала детали, может потребоваться дополнительная термообработка при температуре 150–200°C в течение 2–3 ч.

Контроль качества износостойких хромовых покрытий включает оценку внешнего вида, толщины слоя, адгезии, а для пористых покрытий – также проверку пористости или маслоёмкости.

К покрытиям, наносимым с высокой точностью без последующей механической обработки, предъявляются повышенные требования: поверхность должна быть равномерной, гладкой, с допустимым уровнем шероховатости, соответствующим условиям эксплуатации детали.

1.9. Упрочнение рабочей поверхности тонкостенной ремонтной втулки методом физического осаждения (PVD)

Для упрочнения рабочей поверхности втулки методом физического осаждения (PVD) выбран TiN. Выбору покрытия способствуют: относительно простая технология его получения, невысокая стоимость исходных материалов (титан почти на порядок дешевле остальных тугоплавких металлов, азот – наиболее доступен, дешев и безопасен по сравнению с другими реакционными газами) и самое главное – высокие эксплуатационные характеристики. Микротвердость такого покрытия может изменяться в пределах 20000–40000 МПа и зависит главным образом от давления азота в вакуумной камере в процессе осаждения. Покрытие TiN достаточно универсально и успешно применяется в условиях адгезионно-усталостного и абразивного изнашивания.

Принципиальная схема метода физического осаждения (PVD) покрытий приведена на рисунке 1.21.

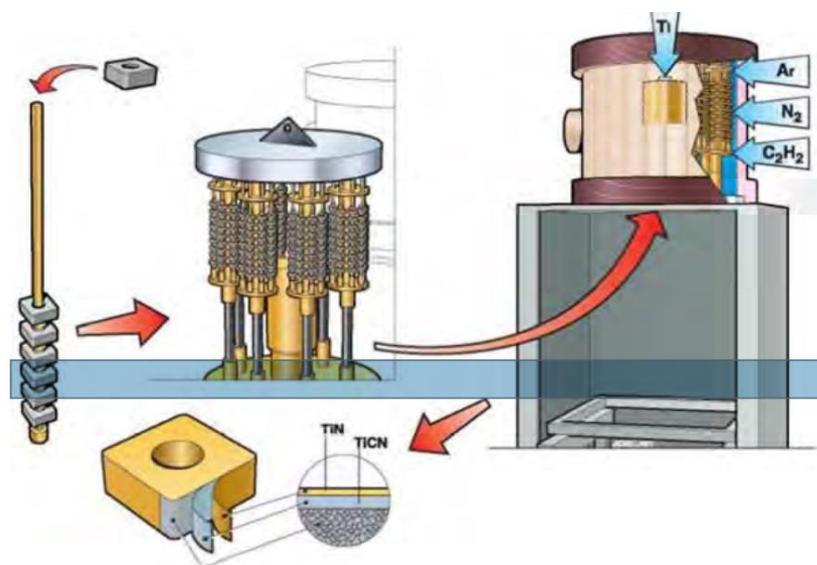


Рисунок 1.21 – Принципиальная схема метода PVD

Для нанесения покрытий методом распыления широко используются магнетронные системы (рисунок 1.22). Магнетронный метод представляет собой разновидность метода катодного распыления, при котором у поверхности распыляемого катода (мишени) с помощью скрещенных магнитного и

электрического поля формируется слой плазмы, плотность которой на порядки больше, чем в обычных (безмагнитных) системах катодного распыления. Это приводит к увеличению плотности ионного тока на катоде, ускорению распыления, а также позволяет снизить давление рабочего газа и улучшить качество осаждаемых слоев. Распыленные частицы покидают мишень в виде нейтральных атомов с энергией около 10 эВ, а затем частично ионизируются в плазме тлеющего разряда.

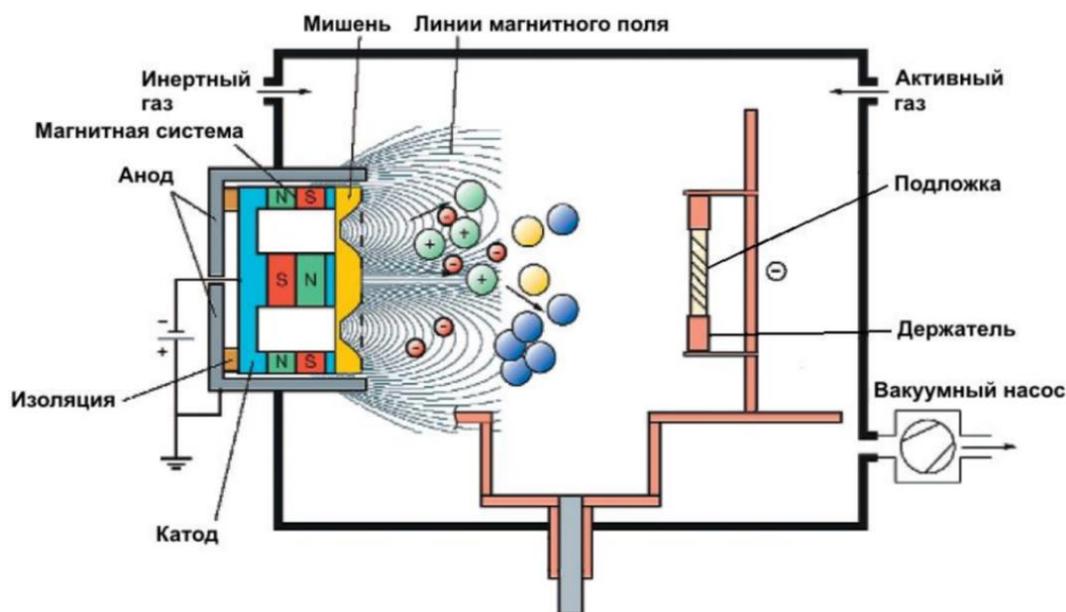


Рисунок 1.22 – Принципиальная схема метода PVD с магнетроном

Характеристики метода нанесения PVD–покрытий магнетронным распылением представлены в таблице 1.8.

Таблица 1.8 – Характеристики метода нанесения PVD–покрытий магнетронным распылением

Параметр	Значения
Рабочее давление, Па	10^{-2} –1
Разрядное напряжение, В	300–700
Сила тока, А	1–200
Расходуемый электрод	катод
Энергия генерируемых частиц, эВ	1–10
Степень ионизации металлического пара, %	10–20
Скорость осаждения покрытия, мкм/ч	1–10

При осаждении покрытия на подложку подают отрицательный потенциал, что вызывает бомбардировку осаждаемого слоя ионами инертного газа и

распыленного материала. Ионная бомбардировка формирующегося слоя вызывает возникновение сжимающих напряжений, что способствует образованию столбчатой структуры зерен. Атомы мишени покидают её в нейтральном состоянии, поэтому их ионизация происходит в межэлектродном промежутке, что объясняет сравнительно низкую степень ионизации. Поэтому плотность ионного тока на подложке такова, что температура поверхности покрытия существенно не отличается от температуры подложки. Несмотря на относительно низкую степень ионизации, ионная бомбардировка оказывает существенное влияние на структуру и свойства конденсатов, способствуя измельчению зерен, снижению пористости, увеличению сжимающих напряжений и, соответственно, твердости покрытий. Ключевое преимущество метода – отсутствие капельных включений в потоке осаждаемого материала.

Современные установки реализуют замкнутый технологический цикл, включающий следующие этапы:

- размещение подготовленных деталей в очищенной вакуумной камере;
- откачивание воздуха из камеры;
- нагрев материала инфракрасным излучением и ионной бомбардировкой;
- финишная подготовка поверхности методом ионного травления;
- испарение или распыление материала мишени с одновременной подачей реакционного газа;
- конденсация покрытия – для контроля температуры и усиления сцепления на поверхность подаётся отрицательный потенциал;
- постепенное охлаждение;
- извлечение готовых изделий.

Ключевым требованием выступает предварительная очистка деталей перед обработкой. Она включает многоступенчатую промывку в различных химических растворах, иногда с применением ультразвука, завершающуюся ополаскиванием и сушкой.

1.10. Выводы, цель и задачи исследования

Анализ состояния парка сельскохозяйственной техники, условий работы, причин отказов соединений «вал–манжета» и научных разработок по совершенствованию уплотнительных устройств подшипниковых узлов позволили сформулировать следующие выводы:

1. Одной из причин низкой надежности отечественной сельскохозяйственной техники, работающей в тяжелых условиях, является преждевременный отказ уплотнительных устройств. Нарушение герметичности соединений «вал–манжета» снижает надежность эксплуатации машин, увеличивает затраты при ремонте, повышает расход смазочных материалов, ухудшает экологию. Установлено, около 90% случаев аварийных разрушений подшипников вызвано неудовлетворительной работой уплотнений.

2. Наиболее ответственная и ресурсопределяющая деталь агрегата – вал. Восстановление рабочих поверхностей в зоне контакта с уплотнениями требуют большинство валов, поступающих в капитальный ремонт (~ 73%). Ремонт или замена узлов и агрегатов – это простой техники, дорогостоящие и трудоемкие операции ремонта. Ремонт вала с применением тонкостенной ремонтной втулки является самым быстрым, эффективным и экономически выгодным способом, позволяющим восстановить рабочие свойства наружной цилиндрической поверхности вала в зоне контакта с уплотнением в минимальные сроки, без снятия и разборки агрегатов и узлов в полевых условиях.

3. Снижение износа в соединении за счет повышения твердости и износостойкости поверхности вала в зоне контакта с уплотнением является одним из направлений повышения работоспособности уплотнительных устройств.

4. Проведенный анализ показывает, что восстановление соединения «вал–манжета» в целом и поверхности вала в частности можно обеспечить применением тонкостенной ремонтной втулки с заданными характеристиками рабочей поверхности. В настоящее время ремонтные втулки производятся иностранными компаниями, в Российской Федерации их разработка и выпуск не налажены.

5. Анализ состояния проблемы явился основой для формулирования целей и задач исследования.

Цель исследования. Разработать метод безразборного восстановления соединения «вал-манжета» подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели исследования предусмотрено решение следующих задач:

1. Выполнить анализ существующих методов восстановления рабочей поверхности вала под манжету;
2. Теоретически обосновать параметры тонкостенных ремонтных втулок для восстановления работоспособности соединения «вал–манжета»;
3. Исследовать влияние упрочнения рабочей поверхности втулки на износостойкость и фрикционные характеристики соединения «вал–манжета»;
4. Разработать технологию изготовления тонкостенной ремонтной втулки;
5. Оценить технико-экономическую эффективность результатов исследований.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТОНКОСТЕННОЙ РЕМОНТНОЙ ВТУЛКИ

По ГОСТ 8752–79 для защиты вала, контактирующего с манжетой, от износа допускается устанавливать на вал втулку. Кроме защиты вала, ремонтная втулка может обеспечить восстановление наружной цилиндрической поверхности при износе вала. Вопрос применения втулок при ремонте валов агрегатов сельскохозяйственной техники изучен недостаточно.

Как видно из приведенных данных, указанных в разделе 1.4, значительный процент валов не отвечает установленным требованиям по таким параметрам, как шероховатость и твердость рабочей поверхности в зоне контакта с манжетой. Установка ремонтной втулки с необходимыми характеристиками обеспечит эти параметры, а геометрические характеристики тонкостенной втулки позволят обеспечить оптимальный натяг в уплотняемом соединении.

Одной из основных задач исследования является обоснование основных характеристик тонкостенных ремонтных втулок в целях обеспечения оптимальных условий работы уплотнительного узла.

2.1. Обоснование толщины тонкостенной ремонтной втулки

Основным уплотняющим элементом манжетного уплотнения является манжета, рабочая кромка которой прижата к цилиндрической поверхности вала. На рисунке 2.1 указаны основные размеры элементов манжеты.

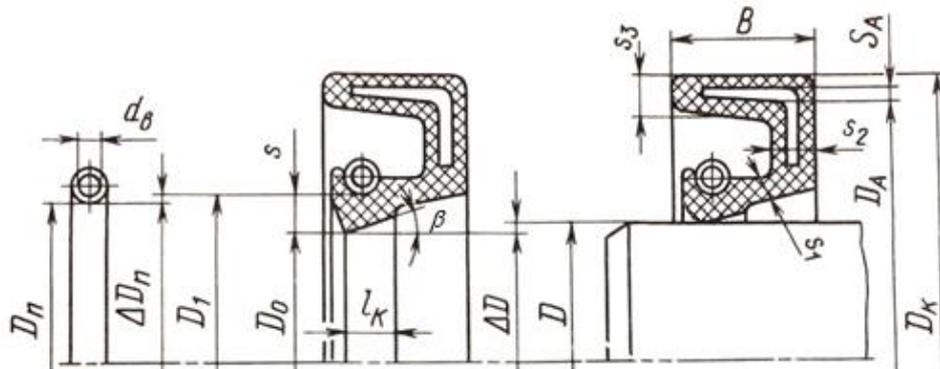


Рисунок 2.1 – Размеры элементов манжеты (основные):
 D, D_{κ}, B – габаритные (регламентируются стандартами); s_1, s_2, s_3, D_A – технологические; $l_{\kappa}, s, \alpha, D_0, D_n, D_1, d_{\delta}, \Delta D_n, \Delta D$ – расчетные

Введем следующие обозначения и единицы измерения для расчетов:

D – диаметр вала, мм;

D_0 – среднее значение минимального диаметра манжеты, мм;

ΔD – разность между диаметром манжеты в рабочем и свободном состоянии, мм;

S_B – толщина ремонтной тонкостенной втулки, мм;

l – длина эластичного элемента манжеты, мм;

Δl – расстояние определяющее положение пружины относительно рабочей кромки, мм;

s – толщина эластичного элемента манжеты в рабочей зоне, мм;

s_1 – толщина эластичного элемента манжеты при изгибе, мм;

s_2 – толщина корпуса манжеты, мм;

a – ширина контакта манжеты и вала, мм;

d_c – средний диаметр пружины, мм;

$d_{\text{п}}$ – диаметр проволоки, мм;

h_1 – максимально возможная радиальная деформация рабочей кромки вала, мм;

p – внутреннее давление, МПа;

p_c – давление среды, МПа;

E – модуль растяжения резины, МПа;

G – модуль сдвига материала пружины, ГПа;

τ_0 – тангенциальное напряжение, возникающее в пружине при изготовлении, Па;

k – коэффициент, учитывающий кривизну витков;

S – площадь сечения эластичного элемента манжеты, испытывающей деформацию растяжения, мм² [77].

Увеличение внутреннего диаметра манжеты ΔD (рисунок 2.2), при установке ее на уплотняемую поверхность, равняется разности между диаметром уплотняемой поверхности и диаметром уплотняющей кромки манжеты в свободном положении [77]:

$$\Delta D = D - D_0. \quad (2.1)$$

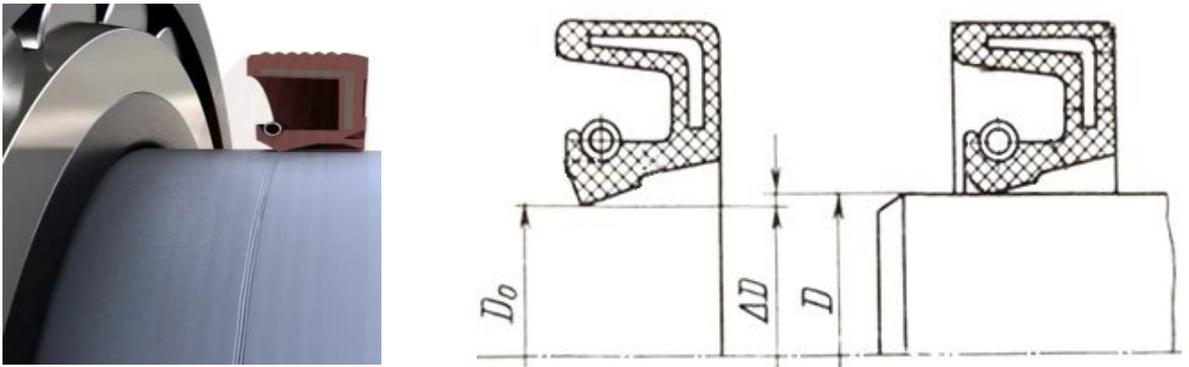


Рисунок 2.2 – Соединение «вал–манжета»

При установке ремонтной втулки (рисунок 2.3) уплотняемой поверхностью станет внешняя поверхность втулки, и увеличение внутреннего диаметра манжеты ΔD будет определяться как

$$\Delta D = (D - D_0) + 2S_B. \quad (2.2)$$

Тогда толщину ремонтной тонкостенной втулки определим по формуле

$$S_B = \frac{\Delta D - (D - D_0)}{2}. \quad (2.3)$$

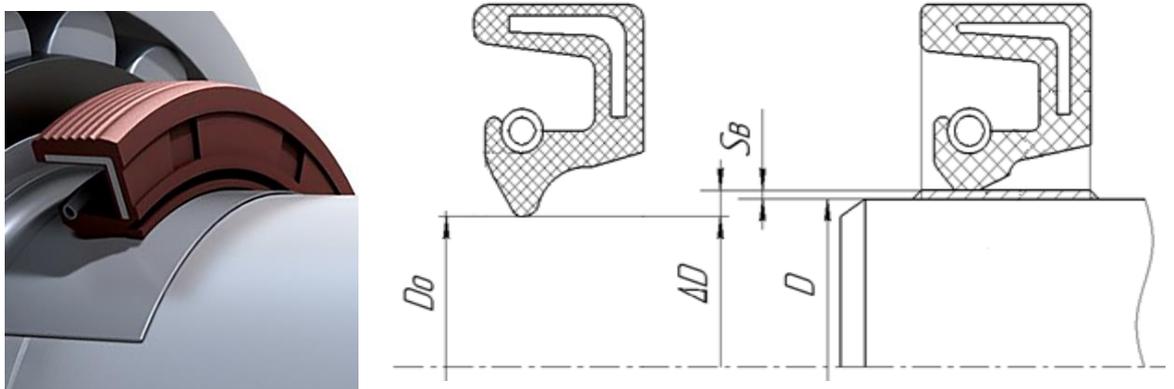


Рисунок 2.3 – Соединение «вал–манжета» с ТРВ

Изменение внутреннего диаметра манжеты ΔD влияет на удельное контактное усилие от растяжения эластичного элемента манжеты, удельное контактное усилие от изгиба эластичного элемента манжеты и удельное контактное усилие от растяжения пружины, которые влияют на суммарное удельное контактное усилие, действующее на эластичный элемент манжеты.

Определяющим параметром, учитывающим большинство конструктивных и эксплуатационных факторов, влияющих на утечки уплотняющей среды, является удельная контактная нагрузка манжеты на вал \bar{F} [75, 76].

Суммарное удельное контактное усилие, действующее на эластичный элемент манжеты, определяется по формуле [15]:

$$\bar{F} = \bar{F}_M + \bar{F}_И + \bar{F}_П + \bar{F}_P, \quad (2.4)$$

где \bar{F}_M – удельное контактное усилие от растяжения эластичного элемента манжеты;

$\bar{F}_И$ – удельное контактное усилие от изгиба эластичного элемента манжеты;

$\bar{F}_П$ – удельное контактное усилие от растяжения пружины;

\bar{F}_P – удельное контактное усилие от давления среды на профиль эластичного элемента манжеты.

Удельное контактное усилие от разности давления уплотняемой среды p_c и внешнего давления p на профиль эластичного элемента манжеты –

$$\bar{F}_P = 0,5(p - p_c)(l - 0,5a - 0,5s_2) + pa + 0,5h_1^2(p - p_c)/l. \quad (2.5)$$

Удельное контактное усилие от растяжения эластичного элемента манжеты –

$$\bar{F}_M = \frac{2ES\Delta D}{(D_0 + s)D}. \quad (2.6)$$

Удельное контактное усилие от изгиба эластичного элемента –

$$\bar{F}_И = \frac{\Delta D E s_1^3}{8l^3}. \quad (2.7)$$

Удельное контактное усилие на рабочую кромку от браслетной пружины –

$$\bar{F}_П = \frac{2F_П(l - \Delta l)}{lD}, \quad (2.8)$$

где

$$F_П = F_0 + \Delta F; \quad (2.9)$$

$$F_0 = \frac{\pi\tau_0 d_П^3}{8k d_c}; \quad (2.10)$$

$$\Delta F = \frac{\Delta L G d_П^5}{8L_0 d_c^3}, \quad (2.11)$$

где

$$\Delta L = \pi \Delta D. \quad (2.12)$$

Подставляя в равенство (2.8) выражения (2.9), (2.10), (2.11), (2.12), получаем:

$$\bar{F}_n = \frac{2 \left(\frac{\pi \tau_0 d_n^3}{8 k d_c} + \frac{\pi \Delta D G d_n^5}{8 L_0 d_c^3} \right) (l - \Delta l)}{l D}. \quad (2.13)$$

Тогда суммарное удельное контактное усилие, действующее на эластичный элемент манжеты:

$$\bar{F} = \bar{F}_p + \frac{2 E S \Delta D}{(D_0 + s) D} + \frac{\Delta D E s_1^3}{8 l^3} + \frac{2 \left(\frac{\pi \tau_0 d_n^3}{8 k d_c} + \frac{\pi \Delta D G d_n^5}{8 L_0 d_c^3} \right) (l - \Delta l)}{l D}. \quad (2.14)$$

Выразим значение ΔD из выражения (2.14) [77]:

$$\Delta D = \frac{\bar{F} - \bar{F}_p - \frac{\pi \tau_0 d_n^3 (l - \Delta l)}{4 k d_c l D}}{\frac{2 E S}{(D_0 + s) D} + \frac{E s_1^3}{8 l^3} + \frac{\pi G d_n^5 (l - \Delta l)}{4 L_0 d_c^3 l D}}. \quad (2.15)$$

Подставив выражение 2.15 в формулу 2.3, получим толщину втулки:

$$S_B = \frac{\bar{F} - \bar{F}_p - \frac{\pi \tau_0 d_n^3 (l - \Delta l)}{4 k d_c l D}}{\frac{4 E S}{(D_0 + s) D} + \frac{E s_1^3}{4 l^3} + \frac{\pi G d_n^5 (l - \Delta l)}{2 L_0 d_c^3 l D}} - \frac{(D - D_0)}{2}. \quad (2.16)$$

2.2. Обоснование минимального уровня твердости рабочей поверхности тонкостенной ремонтной втулки для соединения «вал–манжета»

Одним из основных способов устойчивости к механическому износу является увеличение твердости трущихся поверхностей. Современные технологии позволяют значительно увеличить устойчивость валов к износу за счёт упрочнения их поверхностного слоя, что приводит к существенному росту микротвёрдости рабочей поверхности.

На рисунке 2.4 продемонстрирована зависимость износостойкости от твердости поверхностей, подверженных абразивному воздействию. За эталон принята износостойкость поверхности с твердостью HV 500 (HRC ~ 50).

Увеличение твердости на каждые 500 единиц HV повышает устойчивость к износу в 10 раз.

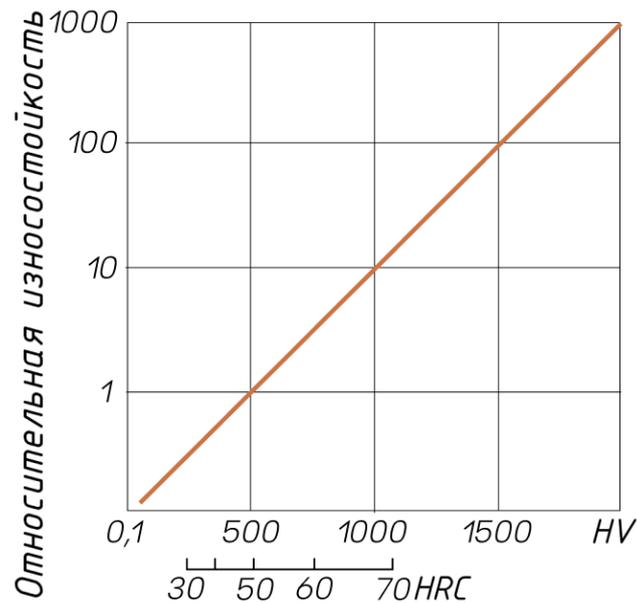


Рисунок 2.4 – Влияние твердости на износостойкость рабочей поверхности

Процесс изнашивания фрикционного контакта определяется структурой сплава, его твердостью, а также формой и природой абразивных частиц.

На схеме, показанной на рисунке 2.5, представлен процесс изнашивания соединения «вал–манжета» [87].

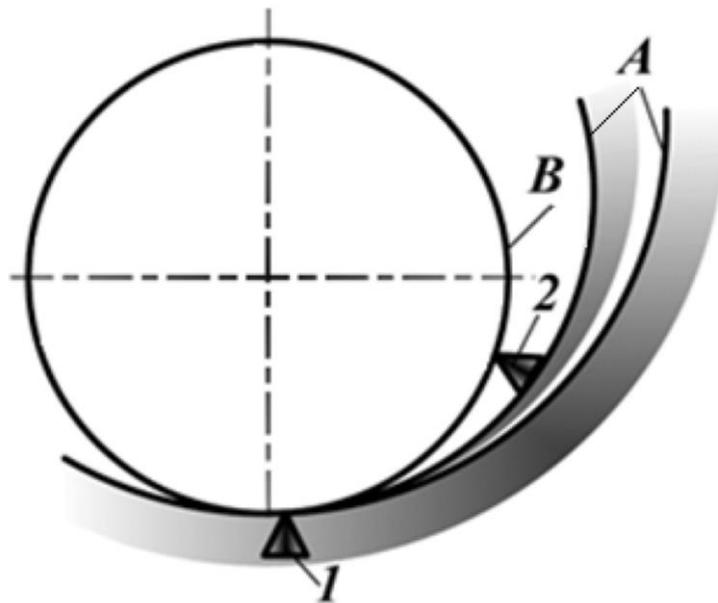


Рисунок 2.5 – Схема абразивного изнашивания:
А – мягкие поверхности; В – твердые поверхности; 1 и 2 – абразивные частицы

Если одна из контактирующих поверхностей (А) выполнена из мягкого материала, частицы 1 внедряются в нее, что при низкой концентрации абразива в смазке защищает твердую поверхность (В) от износа. Однако со временем мягкий слой насыщается частицами и сам начинает действовать как абразив, повреждая сопряженный вал.

При контакте с абразивными частицами выделяют три основных вида разрушения поверхности детали: микрорезание (царапание), многократное деформирование (задир) и коррозионно-механическое истирание.

Если твердость абразивной частицы близка к твердости металла детали, она разрушает защитную окисную пленку (рисунок 2.6, а). В обнажившемся в результате этого металле под влиянием окружающей среды (кислорода и влаги) ускоряются коррозионные процессы, приводя к коррозионно-механическому износу.

Если твердость абразивной частицы превышает твердость основного металла детали, то при контакте происходит пластическое отеснение (смещение) материала (рисунок 2.6, б).

Когда частица врежется в поверхность детали острой гранью, то пластическое отеснение переходит в микрорезание (рисунок 2.6, в).

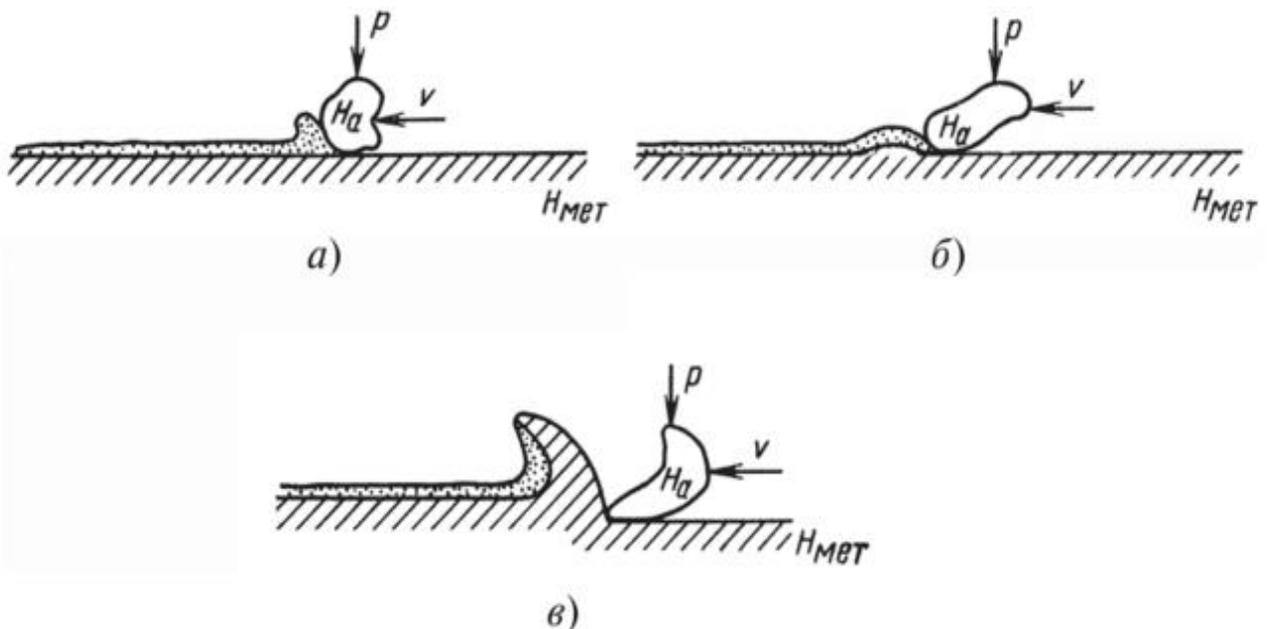


Рисунок 2.6 – Виды взаимодействия поверхности детали с абразивной частицей: а – при коррозионно-механическом изнашивании; б – при пластическом отеснении; в – при микрорезании

Для оценки «степени агрессивности» абразивных частиц по отношению к изнашиваемым поверхностям предложено использовать безразмерный критерий K_T , показывающий способность абразивной частицы твердостью H_a вызывать прямое разрушение материала твердостью H , при условии, что геометрия контактного выступа этой частицы и приложенная к ней сила обеспечивают совершение такого процесса:

$$K_T = \frac{H}{H_a}. \quad (2.17)$$

Профессором М. М. Тененбаумом установлено критическое значение коэффициента твердости $K_T = 0,5 - 0,7$ [88].

Соответственно твердость материала, при которой разрушение рабочей поверхности детали невозможно, можно рассчитать по формуле:

$$H > 0,7H_a. \quad (2.18)$$

В работе А.М. Карапетяна говорится: «Чем выше твердость H материала, по сравнению с твердостью H_a абразивной частицы, тем ниже уровень контактных напряжений, создаваемых этой частицей в поверхностном слое. С увеличением отношения H/H_a снижается предельная нагрузка, которую может выдержать абразивная частица. При превышении этой нагрузки контактный выступ частицы разрушается, что вызывает деконцентрацию контактных напряжений, т.е. снижение их уровня из-за увеличения площади контакта. Площадь контактных площадок увеличивается не в результате упругого или пластического деформирования контактирующих тел, а в результате разрушения одного из них. В результате снижения контактной нагруженности соответственно уменьшается интенсивность изнашивания» [106].

Таким образом, при повышении твердости материалов износостойкость повышается вследствие не только увеличения прочности материала, но и снижения контактной нагруженности и соответствующего уменьшения интенсивности многоциклового процесса разрушения.

Сопротивление абразивному износу можно описать как функцию прочностных свойств и способности деконцентрировать контактные напряжения:

$$\sigma_{\omega} > \Phi(A_p, D_H), \quad (2.19)$$

где A_p – фактор сопротивления материала разрушению под действием абразивных зерен, косвенно оцениваемый твердостью, сопротивлением царапанию, модулем упругости;

D_H – фактор деконцентрации контактных напряжений, условно характеризующийся значением коэффициента K_T .

Фактор D_H определяет в заданных условиях трения формирование процесса изнашивания через соотношение H/H_a , а фактор A_p – сопротивление материала разрушению в сложившемся процессе изнашивания [106].

Непосредственное разрушение микрообъемов поверхностного слоя материалов абразивными частицами возможно при $K_T < 0,5$, т. е. когда твердость абразива вдвое и более превышает твердость материала [89]. В этом случае частица сохраняет свою целостность и форму, обладая достаточной прочностью для разрушения материала.

Если критерий твердости $K_T > 0,7$, то прямое разрушение исключено, так как контактный выступ частицы разрушится прежде, чем напряжения в деформируемом микрообъеме материала достигнут критического значения.

Критерий K_T играет ключевую роль в моделировании абразивного износа, поскольку его значения позволяют заранее определить вероятный механизм разрушения материала. Чем $K_T > 0,7$, тем ниже уровень контактных напряжений и тем слабее интенсивность изнашивания материала.

В зависимости от коэффициента твердости различают две формы абразивного изнашивания:

– механохимический износ, при котором абразивные частицы повреждают только вторичные поверхностные структуры, не затрагивая первичные из-за недостаточной твердости ($K_T > 0,6$). Механизм механохимической формы абразивного изнашивания включает в себя механический контакт и упругопластическую деформацию, активацию – образование слоя деформированного активированного металла, мгновенное пассивирование с

формированием ослабленных вторичных структур и их последующее механическое разрушение;

– механический износ, характеризующийся внедрением абразивных частиц и разрушением поверхностных слоев с возможным образованием микростружки ($K_T < 0,6$).

Критерий формы частиц K_Φ играет ключевую роль при моделировании абразивного износа. Для условий изнашивания в массе абразивных частиц этот критерий вычисляют по формуле

$$K_\Phi > \frac{M(n_i)M(D_i - d_i)}{M(R_i)}, \quad (2.20)$$

где $M(n_i)$, $M(R_i)$ и $M(D_i - d_i)$ – математическое ожидание соответственно для числа вершин, их радиусов и разностей диаметров окружностей, описанной вокруг контура и вписанной в контур зерна [106]. Значения этих параметров приведены в таблицах 2.1, 2.2.

Таблица 2.1 – Характеристики формы частиц абразивных материалов

Параметры формы частиц	Кварц	Карбид бора	Корунд
$M(R_i)$, мкм	50,93	14,92	12,94
$M(n_i)$	5,07	5,46	7,73
$M(D_i - d_i)$, мкм	113,38	123,83	160,65
K_Φ	11,25	45,2	98,6

Таблица 2.2 – Характеристики формы кварцевых частиц различных размеров

Параметры формы частиц	Размер фракции, мм				
	0,2 – 0,315	0,315 – 0,4	0,4 – 0,63	0,63 – 0,8	1,0 – 2,0
$M(R_i)$, мкм	0,03	0,041	0,078	0,086	0,133
$M(n_i)$	4,8	5,04	5,04	5,35	6,72
$M(D_i - d_i)$, мкм	0,09	0,08	0,13	0,11	0,39
K_Φ	14,4	9,9	8,4	6,85	1,97

При увеличении K_Φ , пластическая деформация переходит в прямое разрушение материала. Опытным путем установлено, что при $K_\Phi \leq 11,25$ прямого разрушения материала не происходит независимо от значений K_T .

2.3. Обоснование оптимального микрорельефа поверхности вала в соединении «вал–манжета»

Интенсивность и характер износа тел трения зависит от вида нарушения фрикционных связей. В зависимости от прочности связи, возникающей между эластомером и твердым телом, различают пять видов нарушения единичных адгезионных связей, из которых вытекают три основных вида износа:

- адгезионный, приводящий к своеобразному скатыванию или намазыванию поверхностного слоя эластомера на вал;
- абразивный, вызванный микрорезанием эластомера острыми выступами контактирующей с ним поверхности или частицами загрязнений;
- усталостный, вследствие многократного деформирования поверхностных слоев эластомера выступами неровностей контртела [47].

В целях уменьшения износа, увеличения долговечности пар трения при проектировании контактных уплотнений следует стремиться к созданию условий жидкостного или граничного трения [81, 85]. Жидкостное трение, при котором между трущимися поверхностями существует слой смазки, считается оптимальным. Наличие масляной пленки способствует уменьшению силы трения и температуры в зоне контакта, а также сглаживанию возникающих при работе манжетных уплотнений отрицательных динамических эффектов [81].

Толщина масляной пленки в зоне контакта вала и манжеты зависит от множества факторов, таких как: вязкость смазочного материала, контактное давление, температура, скорость вращения вала, микрорельеф его рабочей поверхности, наличие винтовых рисок, образующихся при механической обработке. Считается, что масляная пленка образуется в результате проникновения жидкости в зону контакта сопрягаемых поверхностей под действием капиллярных сил, а также вследствие вибрации движущихся деталей агрегата, защемляющей жидкость между поверхностями. При оптимальной толщине пленки образуется мениск с противоположной (атмосферной) стороны манжеты. Утечек жидкости через манжету не будет, пока мениск сохраняется.

Гидродинамические эффекты, вызванные микронеровностями на контактирующих участках, играют ключевую роль в формировании разделительного слоя между манжетой и валом [82].

Особенностью манжетного соединения является то, что пленка образуется за счет мельчайших масляных гидродинамических клиньев на поверхностных неровностях. Кроме этого, многими исследованиями установлено, что поверхность резины представляет собой совокупность n приблизительно полусфер диаметром $d_c = 5-10$ мкм.

Как видно из формулы 2.20, толщина масляной пленки h [82] зависит от Rv_1 – максимальной глубины впадины микрорельефа вала, мкм; Rv_2 – максимальной глубины впадины микрорельефа манжеты, мкм; μ – вязкости жидкости; d – диаметра сопрягаемых поверхностей, мм; v – скорости относительного движения вала и манжеты; E – модуля упругости резины, из которой сделана манжета:

$$h = 0,81 \sqrt{\frac{d \cdot \mu \cdot v}{E} + (Rv_1 + Rv_2)}. \quad (2.21)$$

Экспериментальные измерения с использованием токопроводящих резин выявили, что толщина пленки в масляной среде составляет около 2,5 мкм [26].

В рабочем режиме в зоне контакта протекают взаимосвязанные физические, физико-химические и электрические процессы, влияющие на износ. Эти явления зависят не только от свойств материалов, но и от микрорельефа вала.

Оптимальный микрорельеф поверхности вала в зоне контакта с манжетой позволяет удерживать смазочный материал в зоне контакта при длительных простоях и обеспечивает постоянное наличие масляной пленки с определенной несущей способностью.

Согласно молекулярно-механической теории, трение и износ определяются высотой микронеровностей и радиусом их скругления. Шероховатость поверхности, оцениваемая в пределах базовой длины, служит основным показателем ее качества.

Поскольку прочность вала значительно превышает прочность манжеты, при расчетах учитывают преимущественно параметры шероховатости более твердого элемента – вала.

Микрорельеф поверхности (рисунок 2.7) во многом определяет ее поведение в процессе эксплуатации.

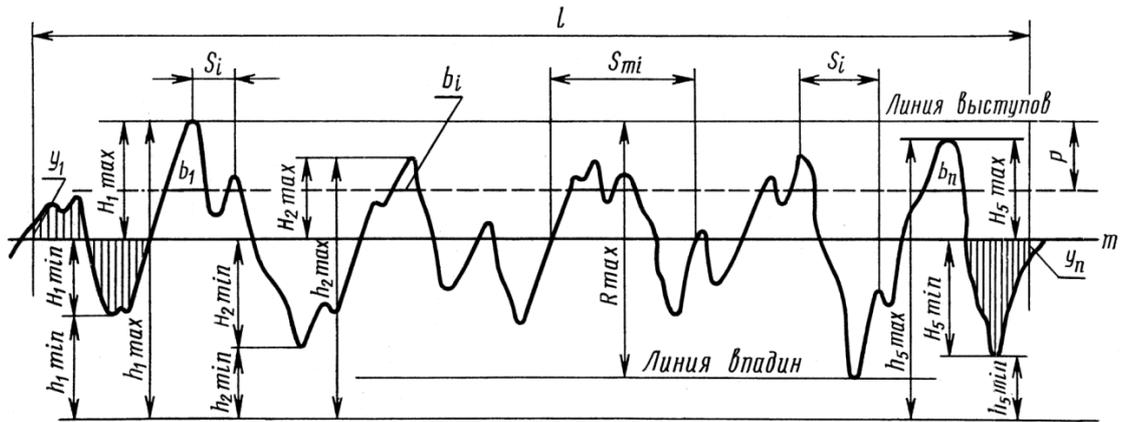


Рисунок 2.7 – Параметры шероховатости поверхности

Параметры шероховатости:

1. Ra – среднее арифметическое отклонение профиля:

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|. \quad (2.22)$$

2. Rz – выборка из десяти точек, по которым определяется высота неровности:

$$Rz = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pmi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vmi}|}{5}. \quad (2.23)$$

3. R_{max} – максимальная высота профиля.
4. S_m – средний шаг неровности.
5. S – средний шаг местных выступов на металле.
6. t_p – относительная опорная длина, где p – это уровень сечения заготовки.

Первоначальный износ сопрягаемых деталей зависит от формы и высоты микронеровностей. Зависимость интенсивности износа от высоты неровностей иллюстрируется рисунком 2.8.

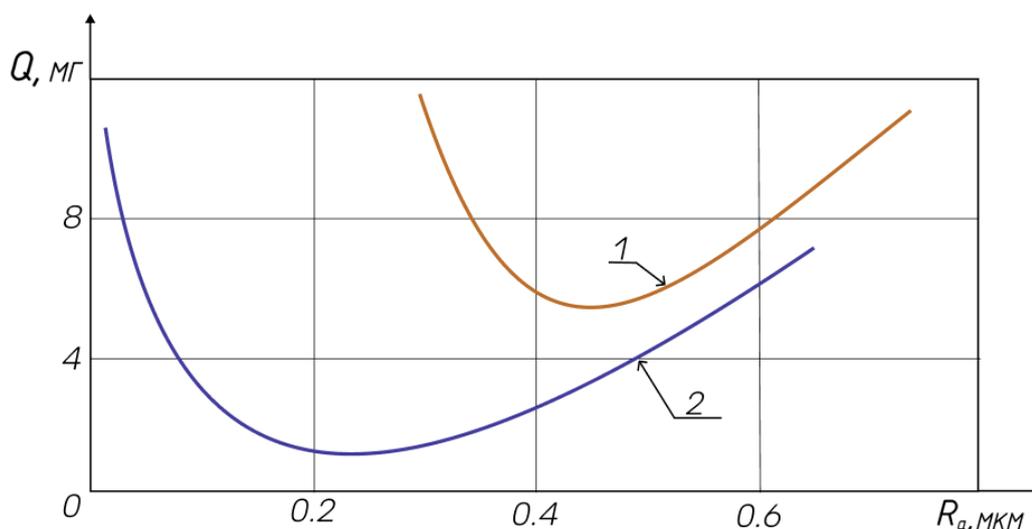


Рисунок 2.8 – Влияние высоты микронеровностей R_a на величину износа:
 1 – для трудных условий трения; 2 – для менее трудных условий трения

При увеличении высоты шероховатости относительно оптимальных значений повышается интенсивность изнашивания в следствии возрастания механического сцепления, среза и скалывания микронеровностей поверхности. При работе валов с повышенной шероховатостью ($R_a = 1,25\text{--}2,5$ мкм), несмотря на хорошее удержание смазки, наблюдается значительная деформация мягкого материала пары. Также наблюдается увеличение коэффициента трения из-за возрастания его деформационной составляющей. Это приводит к разрыву масляной пленки и, как следствие, повышенному износу уплотнения. Также абразивные частицы и продукты износа, проникая в область контакта между валом и манжетой, внедряются в материал уплотнения, увеличивая скорость разрушения сопряженных поверхностей. Значительное уменьшение высоты шероховатости рабочей поверхности по отношению к заданному оптимальному значению тоже способствует увеличению интенсивности изнашивания. Так как в результате возникновения молекулярного сцепления и заедания плотно соприкасающихся поверхностей повышенной гладкости происходит выдавливание смазки, приводящей к плохой смачиваемости смазочным материалом зеркально чистых поверхностей. Гладкие поверхности (полированные или шлифованные) с низкой шероховатостью $R_a = 0,04\text{...}0,15$ мкм не способны удерживать и транспортировать смазочный материал в зону контакта вала и уплотнения (например, манжеты), что

приводит к возникновению большого сопротивления сдвигу при так называемом масляном голодании. Помимо этого, за счет увеличения фактической площади контакта сильно увеличивается молекулярная составляющая силы трения, которая приводит к схватыванию.

В соединении «вал–манжета» при равных высотных параметрах микрорельеф может иметь различную форму (рисунок 2.9), что влияет на эксплуатационные свойства детали. В ряде случаев поверхности с равной по высоте, но различной по форме шероховатостью будут неодинаково изнашиваться из-за большой разницы относительной опорной длины микропрофиля поверхности. Например, поверхности с маложестким или среднежестким микропрофилем будут изнашиваться интенсивнее, чем поверхность с жестким микропрофилем. Вместе с тем острые впадины микронеровностей у поверхности с жестким микропрофилем являются концентраторами напряжений, провоцируя ускоренный усталостный и коррозионный износ.

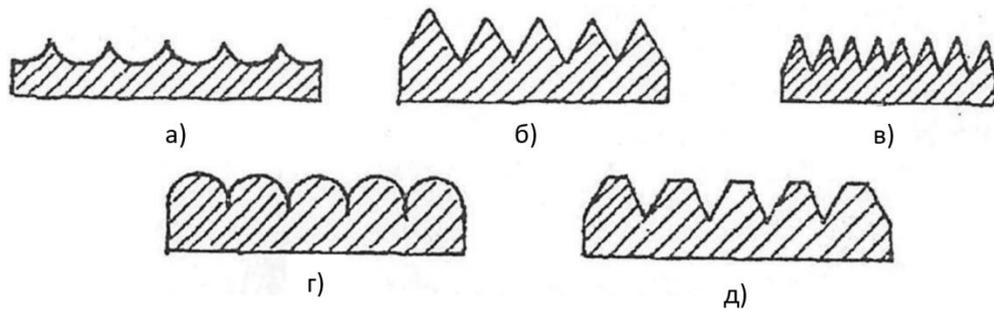


Рисунок 2.9 – Микропрофиль поверхности:
а – маложесткий; б, в – среднежесткий; г, д – жесткий

Установлено, что тонкие и частые микронеровности обеспечивают большую износостойкость, чем неровности той же высоты, но большего шага. Многочисленные эксперименты показывают, что при жидкостном трении и небольшой высоте неровностей направление следов механической обработки значения не имеет [86].

Положительное влияние на работу уплотнительных узлов оказывают рабочие поверхности с хаотично расположенными микровыступами и микровпадинами (матовые рельефы), которые обладают большей гидроемкостью.

Практическое применение таких поверхностей подробно описано в научных публикациях [83, 84].

Матовые поверхности лишены этого недостатка благодаря особой структуре микрорельефа, состоящего из множества изолированных микрополостей. Такая архитектура эффективно удерживает смазку даже под нагрузкой. В результате матовые сопрягаемые поверхности предотвращают выдавливание жидкости при длительном контакте, что снижает статическое трение, минимизирует адгезию, облегчает начальное движение и исключает работу в режиме сухого трения, существенно продлевая срок службы узла.

Свойство рабочей поверхности удерживать смазочный материал имеет решающее значение при эксплуатации пар трения. В соединении «вал–манжета» большую проблему представляет так называемый «сухой старт», ведущий к значительному увеличению коэффициента статического трения (иногда в 5–10 раз) при длительной выдержке соединения под нагрузкой. Этот процесс адгезионного схватывания развивается из-за постепенного увеличения реальной площади контакта и вытеснения смазочной пленки из рабочей зоны под давлением [85].

2.4. Выводы

Установлена зависимость толщины тонкостенной ремонтной втулки от параметров вала и манжеты, обеспечивающая функциональный натяг в соединении.

Определен минимальный уровень упрочнения рабочей поверхности тонкостенной ремонтной втулки в соединении «вал–манжета» в зависимости от твердости абразива.

Для соединений «вал–манжета», работающих в различных условиях трения, оптимальным является применение тонкостенных ремонтных втулок с жестким или среднежестким микропрофилем поверхности, обладающей матовым рельефом, с шероховатостью $Ra = 0,32 \dots 0,63$ мкм при v до 5 м/с и $Ra = 0,16 \dots 0,32$ мкм при $v \geq 5$ м/с [17,78, 108].

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Планирование экспериментальных исследований

Основная цель экспериментальных исследований – изучение влияния рабочей поверхности тонкостенной ремонтной втулки на работоспособность соединения «вал–манжета».

Экспериментальные исследования включают определение исходных параметров и маркировку исследуемых образцов, стендовые и эксплуатационные испытания.

План проведения экспериментальных исследований включает:

1. Испытания рабочей поверхности втулок на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы;
2. Испытания для определения сил трения и температуры в зоне контакта втулки с манжетой;
3. Испытания для определения износостойкости исследуемых соединений;
4. Эксплуатационные испытания тонкостенных ремонтных втулок.

В целях контроля износа тонкостенных ремонтных втулок на всех стадиях исследования использована методика определения износа рабочей поверхности втулок профилографированием.

3.2. Методика и оборудование для проведения экспериментальных исследований соединения «вал–манжета»

Планирование испытаний проводится в соответствии с ГОСТ 23.224–86 «Методы оценки износостойкости восстановленных деталей» [110], ГОСТ 23.208–79 «Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы» [114], ГОСТ 23.220–84 «Обеспечение износостойкости изделий. Метод оценки истирающей способности поверхностей восстановленных валов», РД 50.424–83 «Методические указания. Надежность в технике. Ускоренные испытания.

Основные положения» [115], ГОСТ 23.211-80 «Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний материалов на изнашивание при фреттинге и фреттинг–коррозии» [116].

3.2.1. Методика испытаний рабочей поверхности втулок на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы

Испытания рабочей поверхности втулок на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы планируются и проводятся в соответствии ГОСТ 23.208 – 79 «Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы».

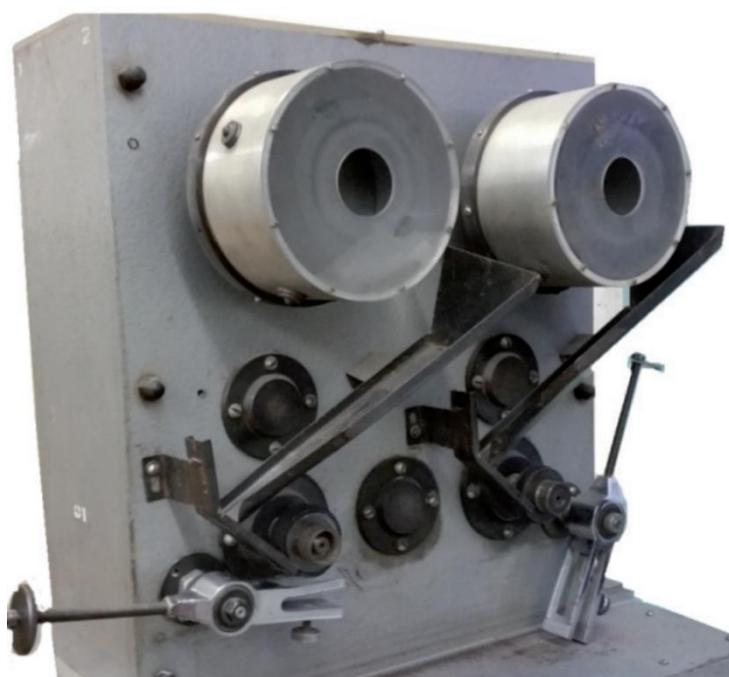
Сущность метода состоит в том, что при одинаковых условиях производят трение образцов исследуемого и эталонного материалов об абразивные частицы, подаваемые в зону трения и прижимаемые к образцу вращающимся резиновым роликом, измеряют износ образцов испытуемого и эталонного материалов, а износостойкость испытуемого материала оценивают путем сравнения его износа с износом эталонного образца.

Испытания планируются провести на установке (рисунке 3.1) [114, 79, 80], содержащей привод 7, обеспечивающий вращение вокруг горизонтальной оси резинового ролика 6, образцедержатель 2, рычаг 3, прижимающий образец 1 к ролику, устройство 5, дозирующее подачу абразивных частиц в зону трения по направляющему лотку 4, устройство 8 для контроля суммарного количества оборотов валика в процессе испытаний.

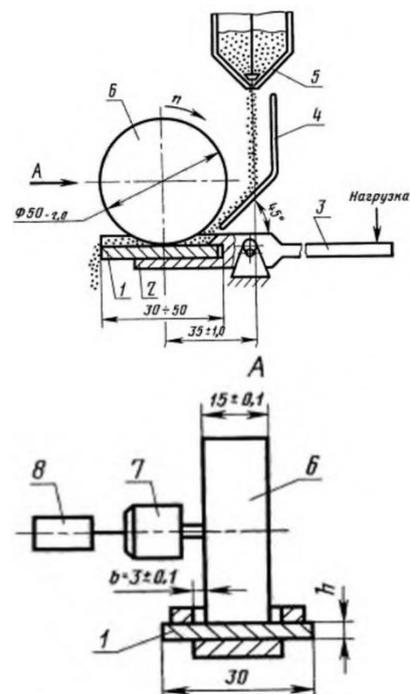
При оценке износостойкости планируется использовать абразивный материал, соответствующий материалу, воздействию при эксплуатации, с размером зерен не более 1,0 мм.

Промывочные жидкости: бензин по НТД; ацетон по ГОСТ 2768–84 [119].

Износ испытуемых и эталонных образцов определяют путем взвешивания до и после испытаний с погрешностью не более 0,1 мг. Взвешивание образцов проводится на лабораторных аналитических весах AND HR–150AZG. Погрешность измерений составляет 0,1 мг (рисунок 3.2).



а)



б)

Рисунок 3.1 – Установка для испытаний на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы:

а) общий вид; б) схема установки

Для изучения поверхности до и после воздействия абразивного материала использовали инвертированный металлографический микроскоп ADF I350M с возможностью увеличения $\times 50$, $\times 500$, $\times 1000$ (рисунок 3.2).



а)



б)

Рисунок 3.2 – Оборудование для испытаний:
а) весы AND HR-150AZG; б) микроскоп ADF I350M

Испытания образца из исследуемого материала продолжают в течение времени, соответствующего количеству оборотов ролика, указанному в таблице 3.1. Испытания образца из эталонного материала проводят при 1800 оборотах ролика. Отсчет оборотов проводят от момента начала подачи абразивного материала.

Таблица 3.1 – Зависимость оборотов ролика от твердости материала

Твердость образца HV	Количество оборотов ролика
До 400	600
400-800	1800
Более 800	3600

ГОСТ 23.208 – 79 определяет: «По результатам взвешивания образцов до и после испытаний определяют среднеарифметическое значение потери массы $\bar{g}_э$ эталонных образцов и среднеарифметическое значение $\bar{g}_и$ потери массы образцов исследуемого материала по формулам:

$$\bar{g}_э = \frac{\sum_{i=1}^3 g_{эi}}{3}. \quad (3.1)$$

$$\bar{g}_и = \frac{\sum_{i=1}^m g_{иi}}{m}, \quad (3.2)$$

где

$g_{эi}$, $g_{иi}$ – значения потерь массы при испытаниях эталонных образцов и образцов исследуемого материала, г;

m – количество образцов исследуемого материала.

Относительную износостойкость $K_и$ исследуемого материала вычисляют по формуле

$$K_и = \frac{\bar{g}_э \rho_и N_и}{\bar{g}_и \rho_э N_э}, \quad (3.3)$$

где

$\rho_э$, $\rho_и$ – плотности эталонного и исследуемого материалов, г/см²;

$n_э$, $n_и$ – количество оборотов ролика при испытаниях эталонного и исследуемого материалов» [114].

3.2.2. Методика испытаний для определения сил трения и температуры в зоне контакта втулки с манжетой

Испытания для определения сил трения и температуры в зоне контакта вала и манжеты планируется провести в три этапа:

1. Определение величины пускового и установившегося усилия трения, температуры в зоне контакта манжеты с валом при приработке новой манжеты;
2. Определение величины пускового и установившегося усилия трения в узле после:

- перерыва в работе 30 с;
- перерыва в работе 1 ч;
- перерыва в работе 12 ч;
- перерыве в работе 24 ч.

3. Определение величины пускового и установившегося усилия трения, температуры в зоне контакта манжеты с валом в условиях граничного трения (отсутствие масла в системе).

Стабилизация температуры и силы трения в зоне контакта ТРВ и манжеты определяют продолжительность испытаний.

Для проведения испытаний планируется использовать установку СИМ-1. Общий вид установки СИМ-1 представлен на рисунке 3.3. Измерения усилия трения в соединении «вал–манжета» планируется провести на специальном устройстве, смонтированном вместо одной рабочей камеры установки СИМ-1 (рисунки 3.4, 3.5).



Рисунок 3.3 – Общий вид установки для стендовых испытаний

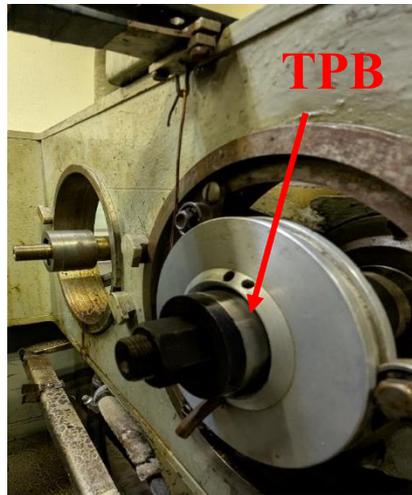


Рисунок 3.4 – Специальное устройство для измерения усилия трения в соединении «вал–манжета»

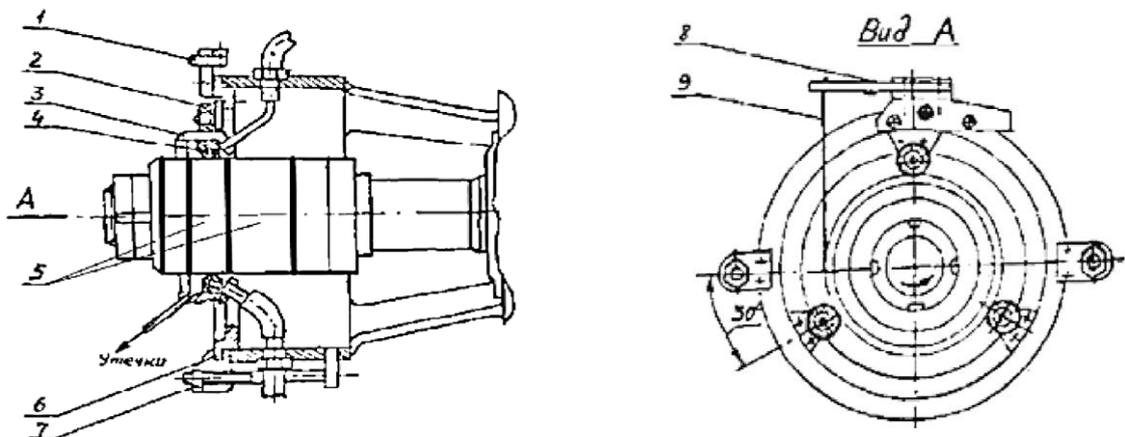


Рисунок 3.5 – Схема специального устройства для измерения усилия трения в соединении «вал-манжета»: 1 – тензобалка; 2 – подшипник; 3 – обойма поворотная; 4 – манжета; 5 – втулка (или ТРВ); 6 – корпус; 7 – зажим; 8 – тензодатчик; 9 – нить жесткая

Для измерения температуры в соединении «вал–манжета» при различных режимах испытаний использован инфракрасный пирометр Kraftool TRM–1700 45701 (рисунок 3.6), который обеспечивает бесконтактное измерение температуры. Используемое программное обеспечение позволяет проводить мониторинг температуры в реальном времени.

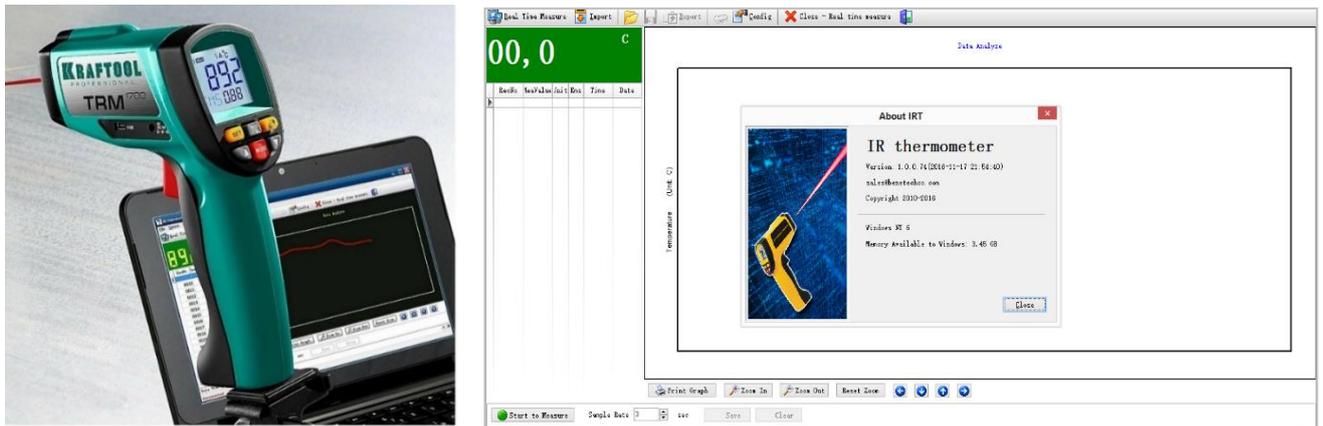


Рисунок 3.6 – Инфракрасный пирометр Kraftool

Испытания планируется провести для эталонных пар трения и пар трения с тремя видами тонкостенных ремонтных втулок. В качестве эталонных трибосоединений будут использованы пары трения – втулки из стали 45 и манжеты 1.1–45x65–1 из серийной резины ИРП–1068 (параметры деталей соответствуют ГОСТ 8752–79).

Измерение усилия трения проводится следующим образом: при включении электропривода сила трения увлекает манжету 4 за валом с втулкой (ТРВ) 5. Под действием этой силы обойма 3 устройства поворачивается по ходу вращения вала. Усилие через жесткую нить 9 передается на тензобалку 8 и фиксируется осциллографом.

Перед установкой манжеты и рабочие поверхности втулок и ТРВ осматриваются на наличие дефектов и обезжириваются.

3.2.3. Методика испытаний для определения износостойкости исследуемых соединений

Испытания для определения износостойкости соединений проводятся с

целью определения влияния рабочей поверхности тонкостенных ремонтных втулок на величину износа в соединении «вал–манжета».

Нормативы годовой загрузки тракторов и сельскохозяйственной техники в среднем по РФ в часах эксплуатационного времени составляют:

- для тракторов – 940 ч;
- для зерноуборочных комбайнов – 120 ч [90].

Основная задача при проведении ремонта в полевых условиях – обеспечить минимальные сроки простоя техники и безотказную работу отремонтированных узлов и агрегатов до окончания полевых работ, поэтому целесообразно рассмотреть 940 ч, как минимальное время наработки втулки, так как после окончания полевых работ проводятся диагностические работы и определяют необходимость дальнейших ремонтных работ данных узлов и агрегатов.

Если учесть, что при наличии в смазочном материале 2% абразива показатели интенсивности износа вырастают в 30 раз [91], то длительность испытаний устанавливаем 32 ч.

Испытания представляют собой сравнительные испытания, сущность которых состоит в определении соотношения интенсивностей изнашивания исследуемой и эталонной поверхностей, испытываемых при заранее установленных идентичных условиях [103, 110].

Для испытаний с целью оценки износостойкости соединения «вал-манжета» испытательная установка должна обеспечивать воспроизведение кинематического типа сопряжения. Кинематический тип определяется взаимоположением, геометрией, характером относительного движения трущихся деталей и возможностью их самоустановки [110]. Испытательная установка должна позволить проводить моделирование усредненных условий работы: перерывов (остановок) в работе, изменение частоты вращения вала, изменение температуры в узле и давления уплотняемой среды, попадание абразивных частиц в смазочный материал, работу в пылевом облаке.

При испытаниях по методу группы А объем партии разрешается устанавливать до 5 шт. (ГОСТ 23.224–86).

Стендовые испытания на износ планируется провести в два этапа.

На первом этапе проводятся испытания эталонных трибосоединений, изготовленных в соответствии с ГОСТ 8752–79, для установления износа рабочей поверхности втулки и рабочей кромки манжеты на каждой ступени испытаний с целью проведения сравнительного анализа с другими трибосоединениями.

На втором этапе проводятся испытания трех видов трибосоединений, состоящих из тонкостенных ремонтных втулок и манжет, по установленным параметрам первого этапа испытаний и устанавливается износ рабочей поверхности ТРВ и рабочей кромки манжеты для этих соединений.

На каждой ступени испытаний первого и второго этапов для определения износа манжет проводятся измерения внутреннего диаметра манжет и профилометрия рабочих поверхностей втулок (ТРВ).

Установлены следующие ступени испытаний:

- приработочная ступень – до стабилизации сил трения и температуры (не менее 120 мин);
- нормальная ступень – до износа поверхности эталонной втулки на глубину не более 0,2 мм (предельный износ ТРВ), или за время не менее 32 ч, или до начала утечек смазочного материала.

Приработка в соединении «вал–манжета» проводится при частоте вращения вала (300 ± 10) мин⁻¹. Площадь поверхности прилегания контролируют периодическим осмотром рабочих поверхностей после первых пяти минут, а затем через каждые 30 мин. испытаний без съема образцов с испытательной установки.

Условия нормального режима позволяют воспроизводить условия эксплуатации агрегата в реальных условиях: цикличность использования («работа – остановка – работа»), попадание абразивных частиц в смазочный материал, работа в пылевом облаке. Испытания проводятся при частоте вращения вала $n = 600 - 1350$ об/мин и давлении уплотняемой среды $p = 0,05 - 0,15$ МПа. Концентрация абразивных частиц в смазочном материале может достигать $3 \pm 0,5\%$ по массе [110].

Для определения износа на нормальной ступени, трибосоединения через каждые 9 ч, до достижения 18 ч наработки, а затем через 14 ч наработки, снимаются, промываются, проводится профилография рабочей поверхности втулки (ТРВ) в 8 точках в радиальном направлении и измеряется внутренний диаметр манжеты. Результаты измерений вносятся в протокол испытаний.

Средний линейный износ образца на данной ступени испытаний определяют как среднее арифметическое по результатам измерений в контролируемых точках.

Для длительных испытаний используется автомобильное масло без присадок по ГОСТ 10541–78.

В качестве абразивного материала используется смесь, состоящая из 87 % кварцевого песка с микротвердостью 10500 – 11300 МПа (ГОСТ 2138–91) и 13 % оксида алюминия зернистостью 16–II с микротвердостью 22000–24000 МПа (ГОСТ 3647–80).

Для исследования процессов износа в исследуемом соединении был спроектирован и изготовлен специальный стенд, позволяющий проводить одновременные испытания двух соединений.

В качестве двигателя специального стенда используется асинхронный электродвигатель АИР71А2 мощностью 0,75 кВт и частотой вращения 1350 мин^{-1} с частотным преобразователем, который позволяет плавно регулировать частоту вращения от 300 до 1350 мин^{-1} . Для изменения давления уплотняемой среды дополнительно установлен компрессор, который создает давление в рабочей камере.

Схема испытательного стенда представлена на рисунке 3.7.

Центральным звеном испытательного стенда является рабочая камера (рисунок 3.8). Вал установлен на двух подшипниках в корпусе. На вал могут быть установлены втулки с различными свойствами рабочей поверхности. Регулировочные шайбы позволяют перемещать втулку относительно манжеты, что позволяет проводить исследования износа по всей длине втулки. Для предотвращения осевого смещения вала относительно корпуса, опорные шарикоподшипники внутренними кольцами упираются в корпус и фиксируются

стопорными винтами. Для исключения осевого перемещения манжет от вибраций в корпусе устанавливаются стопорные кольца, в которые упираются манжеты при установке. Передача крутящего момента от электродвигателя к валу осуществляется с помощью цепной передачи.

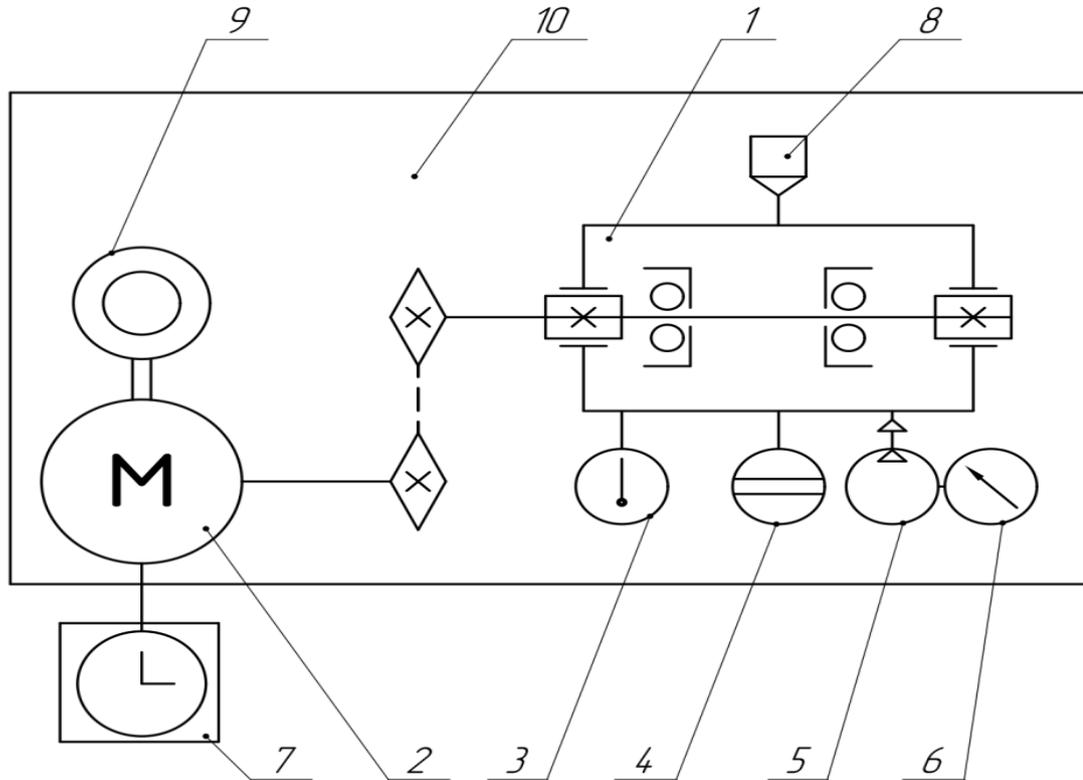


Рисунок 3.7 – Схема испытательного стенда: 1– рабочая камера; 2 – электропривод; 3 – термометр; 4 – указатель уровня масла; 5 – компрессор; 6 – манометр; 7 – прибор для управления временем; 8 – заливная горловина; 9 – тахометр; 10 – основание

Смазочный материал с добавлением абразивных частиц подается в зону контакта вала и манжеты, крыльчаткой, установленной на валу, обеспечивая достаточную стабильность концентрации механических примесей (абразива).

Измерительная система стенда включает тахометр для контроля частоты вращения вала, термометр для контроля температуры масла, прибор для управления временем, компрессор с манометром для создания давления в рабочей полости и измерения его значений.

Крепление корпуса испытательного стенда и электродвигателя к плите осуществляется через виброизолирующие резиновые пластины для уменьшения вибраций.

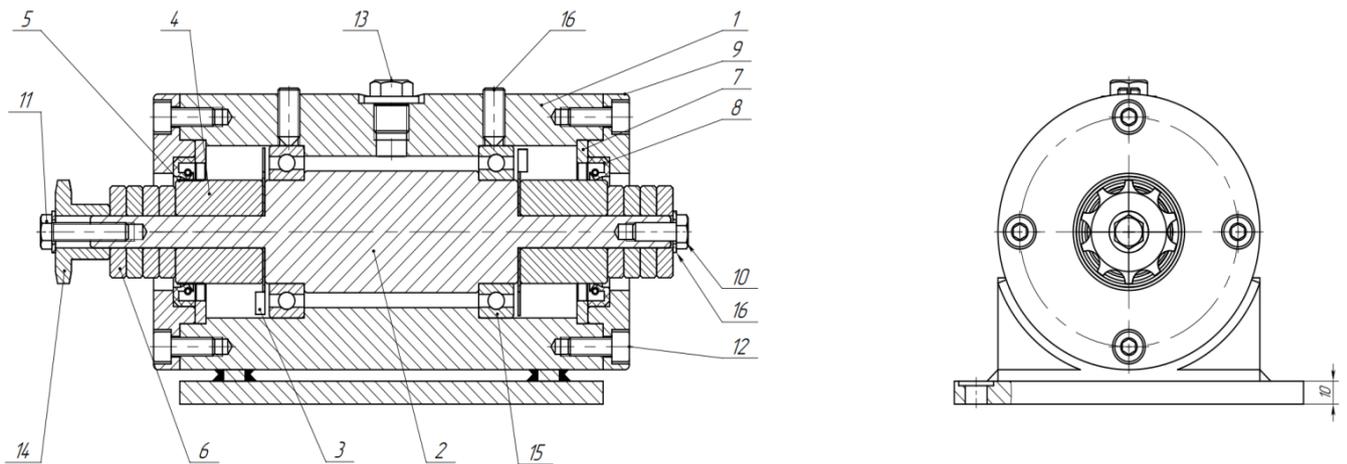


Рисунок 3.8 – Рабочая камера:

1 – корпус; 2 – вал; 3 – крыльчатка; 4 – втулка; 5 – ТРВ; 6 – регулировочная шайба; 7 – стопорное кольцо; 8 – манжета; 9 – крышка торцевая; 10,11 – стопорные винты вала; 12 – винт крепления крышки; 13 – заливная горловина; 14 – звездочка цепная; 15 – подшипник; 16 – стопорная шайба

Технические характеристики испытательного стенда приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Технические характеристики испытательного стенда

Параметр	Значение
Число рабочих камер, шт.	2
Диаметр втулок (ТРВ), мм	25 - 50
Частота вращения вала, мин ⁻¹	300...1350
Система подачи рабочей жидкости	разбрызгиванием
Рабочая жидкость	масло
Температура рабочей жидкости, °С	+20...+120
Радиальное биение вала, мм	0...0,1
Мощность двигателя электропривода, кВт	0,75
Напряжение сети, В	220

Подготовительная работа перед проведением испытаний заключается в измерении внутреннего диаметра манжет и осмотре рабочих поверхностей втулок. На рабочих поверхностях втулок и ТРВ не допускаются глубокие царапины, задиры, вмятины, следы коррозии металла, повреждения упрочняющего покрытия. Запрещается использование манжеты при обнаружении надрезов и явных дефектов рабочей кромки, деформации корпуса и т.д.

Износ тонкостенных ремонтных втулок и манжет определяется на оборудовании, представленном на рисунке 3.9. Характеристики приборов указаны в таблице 3.3.



Рисунок 3.9 – Оборудование: а) прибор для измерений шероховатости и контура поверхности MarSurf LD 120; б) профильный измерительный проектор HELIOS 350-Н; в) профилометр MarSurf M400

Таблица 3.3 – Измеряемые параметры и средства измерения

Параметры	Средства измерения	Принцип измерений	Диапазон измерений	Погрешность
Микрорельеф рабочей поверхности втулки	Прибор для измерений шероховатости и контура поверхности MarSurf LD 120	тактильный	от 0,1 до 120 мм	2%
R_a , R_{max} рабочей поверхности втулки	Профилометр MarSurf M400	контактный	от 0,007 до 10 мкм	3%
$D_{вн}$ манжеты	Профильный измерительный проектор HELIOS 350-Н	оптический	Длина: 0–250мм; Угол: 0–360°	$\pm 3'$

3.2.4. Методика эксплуатационных испытаний тонкостенных ремонтных втулок

Эксплуатационные испытания тонкостенных ремонтных втулок планируется провести в одном из сельскохозяйственных предприятий с целью проверки работоспособности ТРВ в реальных условиях эксплуатации. При этом будет оцениваться влияние различных факторов (условий работы, режимы работы, качество смазочного материала) на процессы изнашивания в трибосоединении, прочностные характеристики ТРВ, ресурс деталей.

Подготовительная работа перед проведением испытаний заключается в осмотре исследуемых деталей (на рабочих поверхностях ТРВ не допускаются глубокие царапины, задиры, вмятины, следы коррозии металла, повреждения упрочняющего покрытия, на манжетах не допускаются всевозможные надрезы, явные шероховатости, облои и т.д.).

На первом этапе проводится установка ТРВ на валы в узлы техники, где обнаруживается утечка смазочного материала в соединении «вал–манжета».

На втором этапе, через каждые 500 м/ч или в случае утечек смазочного материала в соединении «вал-манжета», проводится разборка узла и устанавливается износ рабочей поверхности ТРВ и рабочей кромки манжеты для этих соединений.

Результаты измерений вносятся в протокол испытаний.

3.3. Методика определения износа рабочей поверхности втулок профилографированием

В соответствии с ГОСТ 2789–73, шероховатость поверхности – это совокупность неровностей с относительно малыми шагами, образующих рельеф поверхности [109]. Шероховатость поверхности определяется по ее профилю, который представляет собой ломаную линию пересечения поверхности плоскостью, перпендикулярной направлению неровностей. Профиль рассматривается на длине базовой линии, в пределах которой оцениваются параметры шероховатости поверхности.

Современные методы измерения микронеровностей включают использование специализированного оборудования (контактного и бесконтактного типа) [113].

Наибольшее распространение получили контактные щуповые приборы, оснащённые алмазными иглами для сканирования поверхности. К ним относятся профилометры, фиксирующие среднее арифметическое отклонение профиля Ra , и профилографы, записывающие графическое отображение рельефа. Иглы таких

приборов имеют коническую форму с минимальным радиусом закругления наконечника.

ГОСТ 23.224–86 [110] регламентирует процедуру измерения износа деталей методом профилографирования. Общий вид профилографа показан на рисунке 3.10.

На тестируемом образце 1 наносятся контрольные отпечатки 2 и 3, низшие точки которых 4 и 5 должны располагаться на заданной трассе профилографирования 6.

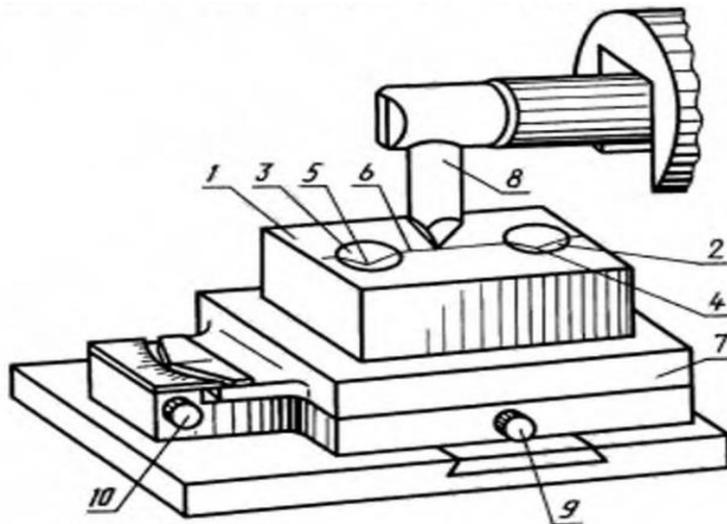


Рисунок 3.10 – Общий вид профилографа

Отпечатки наносятся на твердомере Виккерса согласно ГОСТ 2999–75 [112] с соблюдением следующих условий: изнашиваемая поверхность должна находиться между отпечатками, а их глубина не должна превышать двойного значения износа. Расстояние между отпечатками выбирается исходя из максимально допустимых размеров изнашиваемой поверхности и значением хода иглы щупа профилографа. После нанесения отпечатков 2 и 3 образец устанавливается на предметный столик 7, обеспечивающий горизонтальное перемещение поперек движения иглы 8 щупа с помощью микровинта 9, а также поворот в горизонтальной плоскости посредством микровинта 10.

Образец 1 позиционируется относительно трассы профилографирования 6 с использованием микровинтов 9 и 10 так, чтобы игла 8 проходила через самые

глубокие точки отпечатков 2 и 3. Глубина отпечатков контролируется по отклонению пера самописца.

После проведения испытаний образец снова устанавливают на профилограф и ориентируют указанным образом. Правильность воспроизведения трассы подтверждается, если в соответствии с рисунком 3.11. у профилограмм 1, снятых до и после испытаний, совпадут максимальные глубины отпечатков 2 и 3 и расстояние между нижними точками отпечатков 2 и 3. W – значение износа.

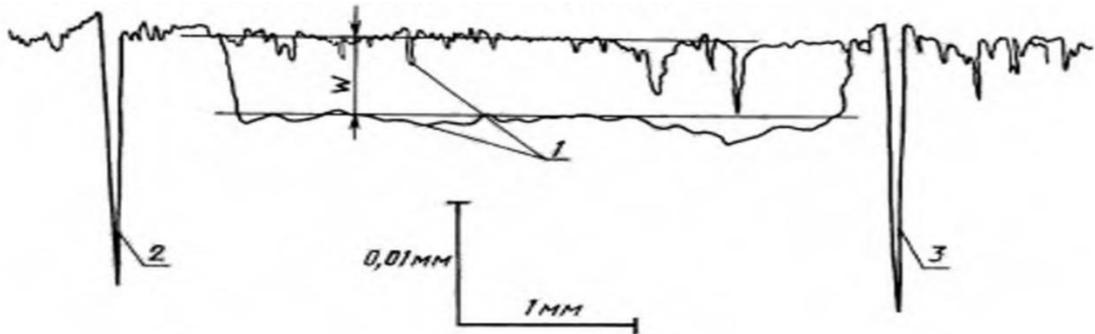


Рисунок 3.11 – Трасса профилографирования

Для измерения износа на каждом этапе испытаний рекомендуется после каждого цикла изнашивания уменьшать хотя бы один размер изнашиваемого участка. Окончательные значения износа определяются после завершения всех этапов, используя сохранившиеся участки изношенных поверхностей, образовавшиеся на каждом этапе. На рисунке 3.12 представлена профилограмма, выполненная по описанной методике.

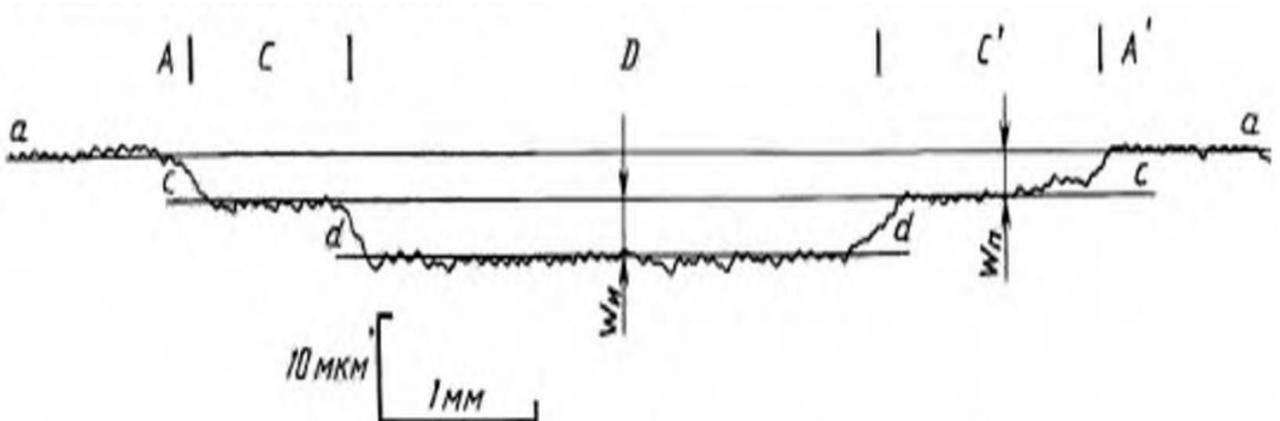


Рисунок 3.12 – Участки изношенных поверхностей при профилографировании

Сохранившиеся на образце участки изношенных поверхностей сформировались на различных этапах изнашивания:

- А и А' – на этапе притирки;
- С и С' – на этапе приработочных испытаний;
- D – на этапе испытаний при нормальном износе.

Анализ профилограммы позволяет вычислить значения приработочного износа W_{II} и на этапе испытаний при нормальном износе W_{II} как промежутки между линиями профилей, образовавшихся на соответствующих этапах.

Для втулок снимают профилограммы с восьми равноотстоящих участков рабочей поверхности образца в радиальном направлении [116] (рисунок 3.13).

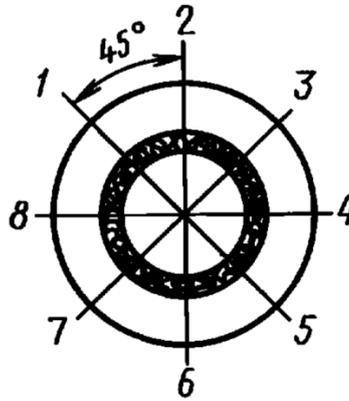


Рисунок 3.13 – Участки рабочей поверхности образца в радиальном направлении при профилографировании

Вычисляют средний износ j -го образца $W_{ср.j}$, мкм, по формуле

$$W_{ср.j} = \frac{\sum_1^8 W_i}{8}. \quad (3.4)$$

Для определения износа W_i используем формулу:

$$W_i = KW, \quad (3.5)$$

где

K – коэффициент пропорциональности;

W – глубина канавки (рисунок 3.14), мм.

$$K = \frac{R_{max}}{(H_{max} + H_{min})}, \quad (3.6)$$

где

R_{max} – максимальная высота профиля, мм;

H_{max} – наибольшая высота выступа, мм (измеряется по профилограмме);
 H_{min} – наибольшая глубина впадины, мм (измеряется по профилограмме).

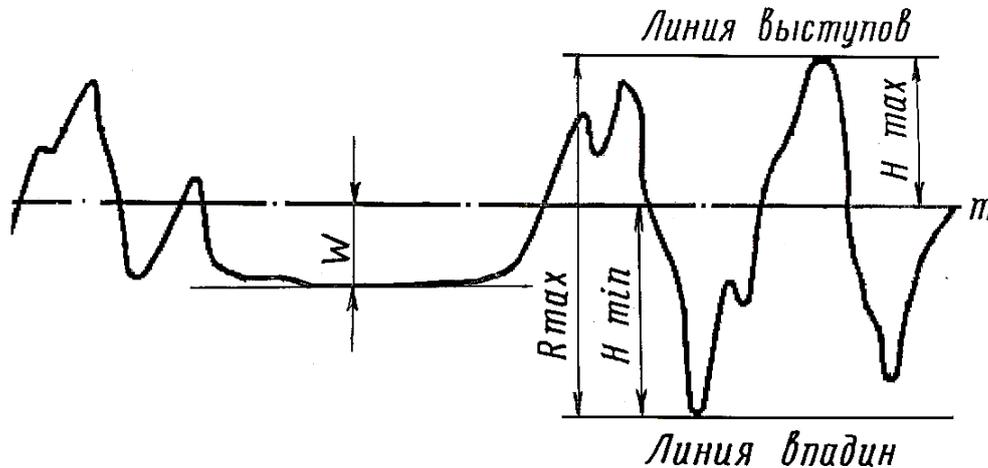


Рисунок 3.14 – Износ ТРВ

Контроль износа тонкостенных ремонтных втулок профилографом осуществляется на всех стадиях исследования:

1. Изготовление заготовок – определяется соответствие шероховатости рабочей поверхности детали требованиям ГОСТ 8752–79;
2. После нанесения упрочняющего покрытия – измерение шероховатости рабочей поверхности детали, определение изменения шероховатости в зависимости от упрочняющего покрытия;
3. В ходе этапов испытаний на износ втулки – определение приработочного износа и износа при нормальных режимах испытаний.

3.4. Обработка результатов экспериментальных исследований

Задача статистической обработки результатов многократных измерений заключается в нахождении оценки измеряемой величины и доверительного интервала, в котором находится истинное значение. Статистические методы обработки результатов измерений используют для описания полученных данных, наиболее близких к истинному значению, для оценки систематических и случайных погрешностей измерений – результатов испытаний [99, 100, 101].

За результат измерения принимают среднее арифметическое результатов наблюдений \bar{X} , из которых исключены систематические погрешности.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad (3.7)$$

где

X_i – отдельное значение определяемого показателя;

n – число наблюдений.

Оценка среднего квадратичного отклонения результатов определяется по формуле показатель рассеивания значений случайной величины относительно её математического ожидания:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}. \quad (3.8)$$

При выборке небольшого объема $n \leq 25$, то можно воспользоваться методом вычисления максимального относительного отклонения:

$$V_p = \frac{|X_{\max(\min)} - \bar{X}|}{S_x}, \quad (3.9)$$

где

$X_{\max(\min)}$ – максимальное (минимальное) значение результатов испытаний;

\bar{X} – среднее арифметическое результатов испытаний;

S_x – среднее квадратическое отклонение результатов испытаний.

Критические значения $V_{кр}$ выбирали с учетом доверительной вероятности, равной 0,95, и объема выборки $n - V_{кр} \equiv V_{кр} \equiv V_{\alpha=0.05; n}$. При значении $V_p < V_{кр}$ подозреваемая величина не является грубой ошибкой.

Однородность совокупности показывает коэффициент вариации. Коэффициент вариации – это относительный показатель разброса данных, выражающий стандартное отклонение как процент от среднего значения [101]:

$$v = \frac{S}{\bar{X}} \cdot 100. \quad (3.10)$$

Если значение коэффициента вариации не превышает 33%, то совокупность считается однородной, а если больше 33%, то – неоднородной.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

4.1. Определение толщины ремонтной втулки для обеспечения заданного суммарного удельного контактного усилия

Расчеты проведены для соединения «вал–манжета», где использовались манжеты с внутренним диаметром $D_0 = 45_{-4,58}^{-2,75}$ мм и валом с диаметром $D = 45h10$ ($45_{-0,1}$ мм).

А.И. Голубев утверждает: «Для обеспечения герметичности необходимо удельное усилие $\bar{F} > 0,2$ Н/мм, при котором масло просачивается без каплеобразования (2–1 класс герметичности) или по 3–5 капель в час (класс 2–2). При удельном усилии $\bar{F} > 0,4$ Н/мм не обеспечивается достаточного смазывания уплотняющей кромки при работе манжет, что создает условия трения без смазочного материала и приводит к увеличению температуры и износа» [17]. Принимаем $\bar{F} = 0,2 \dots 0,4$ Н/мм.

Удельное контактное усилие от разности давления внешней среды p_c и внутреннего давления p на профиль эластичного элемента манжеты определим по формуле 2.5:

$$\bar{F}_p = 0,5(p - p_c)(l - 0,5a - 0,5s_2) + pa + 0,5h_1^2(p - p_c)/l.$$

Эксплуатировать стандартные резиновые армированные манжеты рекомендуется при избыточном давлении до 0,05 МПа [108]. Если избыточное давление отсутствует, т.е. $p = p_c = 0,1$ МПа, то

$$\bar{F}_p = 0,024 \dots 0,041 \text{ Н/мм.}$$

При давлении в механизме $p = 0,15$ МПа удельное контактное усилие

$$\bar{F}_p = 0,185 \dots 0,226 \text{ Н/мм.}$$

Для проведения остальных расчетов использованы данные, приведенные в таблице 4.1 [77, 91, 93].

Подставляя данные в формулу 2.16, получены оптимальные размеры толщины тонкостенной втулки

$$S_B = 0,2 \dots 0,8 \text{ мм.}$$

Таблица 4.1. Значения параметров в соединении «вал–манжета»

Параметр	Значение	Параметр	Значение
E	4 МПа	s	$2,1 \pm 0,1$ мм
G	80 ГПа	s_1	$1 \pm 0,1$ мм
τ_0	200...270 Па	d_c	2,1 мм
k	1,3	d_{Π}	0,4 мм
S	$7...8$ мм ²	Δl	$0,6 \pm 0,1$ мм
D	45 мм	h_1	$3 \pm 0,1$ мм
D_0	41,7	a	0,312 мм
L_0	147...148 мм	s_2	$2,4 \pm 0,2$ мм
l	$6,2 \pm 0,2$ мм		

Полученные данные расчетов подтверждают возможность использования тонкостенной ремонтной втулки при восстановлении герметичности в соединениях «вал–манжета» при ремонте техники, а также при производстве и сборке новых агрегатов для защиты вала и увеличения ресурса уплотнительного узла [77].

Минимальную толщину тонкостенной ремонтной втулки устанавливаем 0,25 мм (связано со сложностью изготовления детали).

4.2. Определение необходимой микротвердости рабочей поверхности тонкостенной ремонтной втулки

Твердость материала, при которой разрушение рабочей поверхности детали невозможно, рассчитывается по формуле 2.18.

Значения микротвердости абразивных частиц представлены в таблице 1.1.

Подставляя в формулу значения микротвердости кварца, как наиболее распространенного элемента пыли, получаем минимальное значение микротвердости рабочей поверхности 7900 МПа, обеспечивающее долгосрочную эксплуатацию втулки при попадании кварца в зазор между втулкой и манжетой.

Подставляя в формулу значения микротвердости оксида алюминия, как наиболее твердого элемента пыли, получаем необходимое значение

микротвердости рабочей поверхности 14700 МПа, обеспечивающее втулкам безыносную эксплуатацию в условиях пылевого облака.

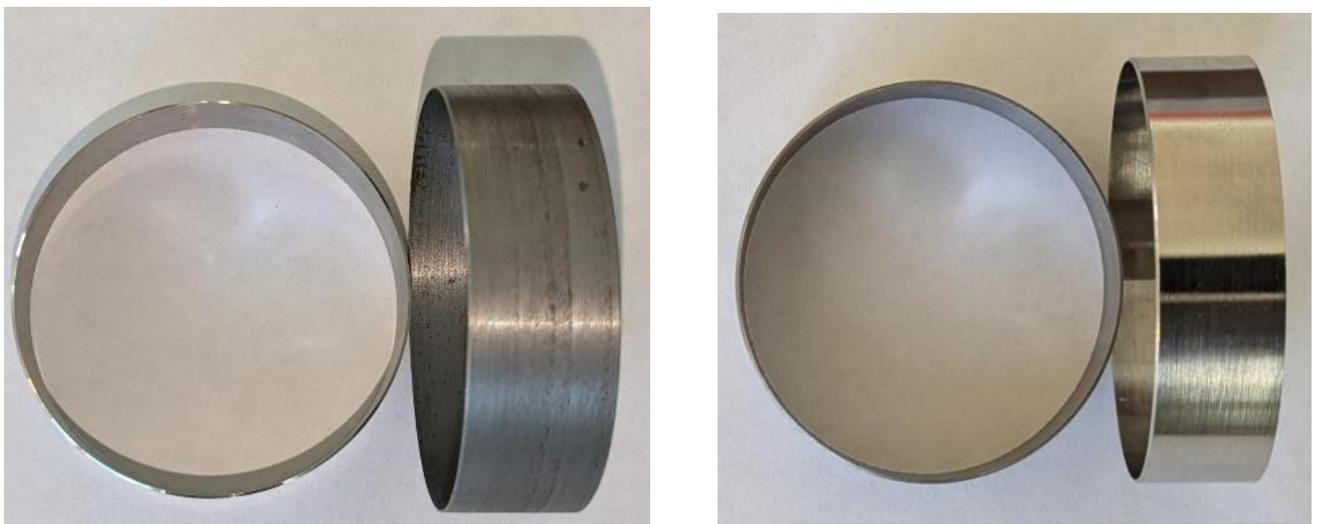
Таким образом, уровень упрочнения втулок в соединениях «вал–манжета» должен составлять не менее 14700 МПа.

По результатам исследований М.М. Хрущова, для минимизации абразивного изнашивания поверхностная твердость материала должна быть не ниже 17000 МПа [92].

4.3. Изготовление тонкостенной ремонтной втулки по заданным параметрам

На основании разработанного технологического процесса (приложение А) изготовлены тонкостенные ремонтные втулки с $S_B = 0,25–0,35$ мм (рисунок 4.1) из стали 40Х и стали AISI 321.

Проведены измерения шероховатости рабочей поверхности заготовок тонкостенных ремонтных втулок. Результаты измерений приведены в таблице 4.2.

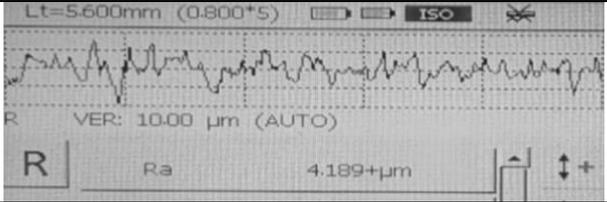
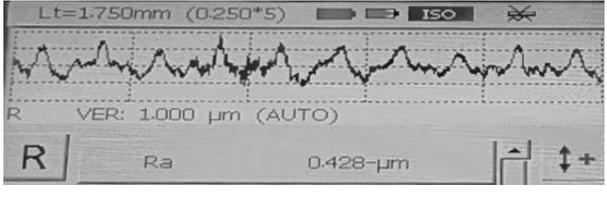


а)

б)

Рисунок 4.1 – Заготовки ремонтных тонкостенных втулок:
а) заготовка из стали 40Х; б) заготовка из стали AISI 321

Таблица 4.2 – Средние значения шероховатости рабочей поверхности

Заготовки ремонтной втулки	Среднее значение R_a , мкм	Показания профилометра
Сталь 40X	$> 0,63$	
Сталь AISI 321	$0,42 - 0,58$	

Полученные результаты измерений шероховатости рабочей поверхности показывают, что средняя шероховатость рабочей поверхности R_a заготовок из стали 40X составила более 0,63, что не соответствует требованиям ГОСТ 8752–79.

По результатам измерений предложено использование заготовок ремонтных втулок из нержавеющей стали для проведения дальнейших исследований с упрочнением поверхности и в качестве самостоятельной детали.

Применение выбранных методов упрочнения (PVD-метод и хромирование) (рисунки 4.2, 4.3) позволило получить образцы тонкостенных ремонтных втулок (рисунок 4.4) с заданными параметрами шероховатости и микротвердости поверхностного слоя (таблица 4.3).

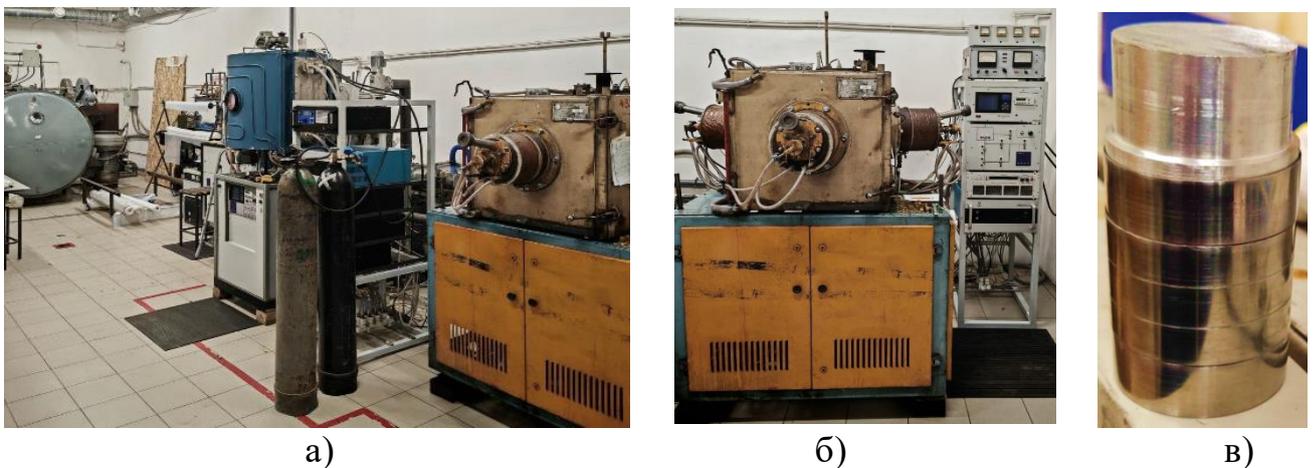


Рисунок 4.2 – Оборудование для нанесения покрытий методом физического осаждения (PVD): а) участок цеха нанесения покрытий; б) вакуумная камера; в) оправка с ТРВ



а)

б)

Рисунок 4.3 – Оборудование участка упрочнения деталей хромированием: а) участок нанесения покрытий; б) подвесное устройство с оправками для ТРВ



а)

б)

в)

Рисунок 4.4 – Тонкостенная ремонтная втулка: а) без упрочнения; б) с упрочнением ХТВ21; в) с упрочнением TiN

Таблица 4.3 – Характеристика ТРВ и упрочняющих покрытий

Материал ТРВ / Метод упрочнения	Обозначение покрытия	Толщина покрытия, мкм	Микротвердость рабочей поверхности, МПа
Сталь AISI 321	нет	нет	4080
Сталь AISI 321 / Электролитическое покрытие (Хромирование твердое)	ХТВ21	21–30	11000–12000
Сталь AISI 321 / Физическое осаждение PVD	TiN	4,2–5,2	18900–21700

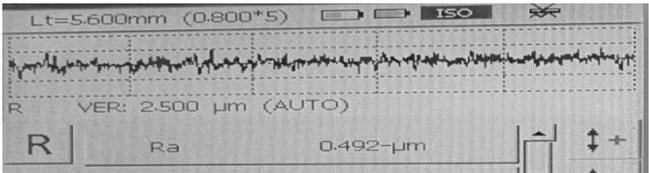
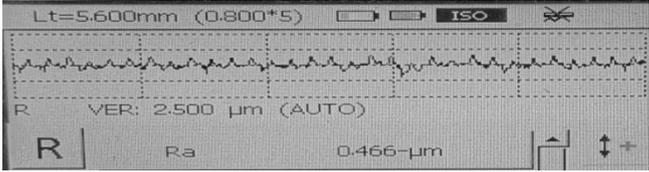
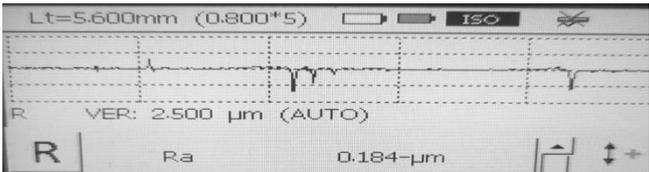
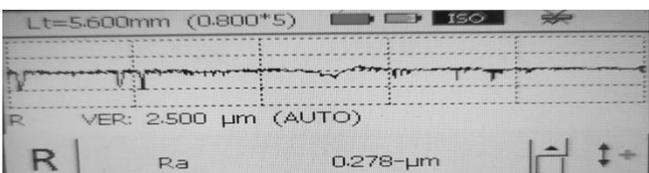
Заявленные характеристики ТРВ с упрочнением рабочей поверхности подтверждаются актами выполненных работ (приложение Б, В):

1. Акт выполненных работ № 122 от 23.10. 2024 г. ООО «Химкрофф» (Хромирование твердое).

2. Паспорт качества от 24.10.2024 г. ООО «ВМ–Технологии» (Вакуумное покрытие).

Результаты профилографирования рабочих поверхностей втулки из стали 45 и ТРВ представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты профилографирования деталей

Деталь	Шероховатость рабочей поверхности R_a , мкм	Профилограмма рабочей поверхности
Сталь 45	0,47 – 0,53	
Сталь AISI 321/ без упрочнения	0,42 – 0,58	
Сталь AISI 321 / Электролитическое покрытие (Хромирование твердое), ХТВ21	0,11 – 0,19	
Сталь AISI 321 / Физическое осаждение PVD, TiN	0,18 – 0,29	

Шероховатость рабочих поверхностей всех деталей соответствует требованиям ГОСТ 8752–79, однако профилограммы показывают, что лучший микрорельеф у ТРВ из стали AISI 321 без упрочнения. ТРВ из стали AISI 321 с упрочнением рабочей поверхности TiN с хаотично расположенными

микровыступами и микровпадинами (матовый рельеф) должны обладать большей гидроемкостью. «Гладкая» рабочая поверхность ТРВ с поверхностным упрочнением Хтв21 не способствует удержанию смазочного материала в зоне контакта, что должно привести к работе трибосоединения в условиях сухого трения в начале скольжения и граничного трения при недостатке смазки в зоне контакта.

Для проведения стендовых испытаний изготовлены 4 вида трибосоединений (рисунок 4.5). Состав трибосоединений для испытаний приведен в таблице 4.5.

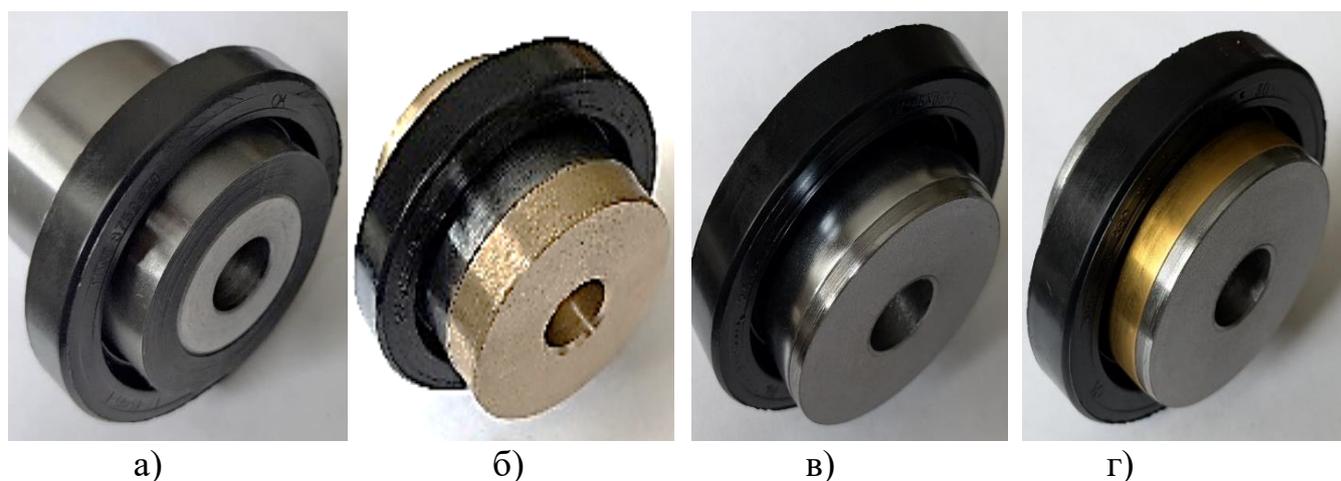


Рисунок 4.5 – Образцы трибосоединений: а) манжета и втулка из стали 45; б) манжета и ТРВ из стали AISI 321 без упрочнения рабочей поверхности; в) манжета и ТРВ с упрочнением рабочей поверхности Хтв21; г) манжета и ТРВ с упрочнением рабочей поверхности TiN

Таблица 4.5 – Трибосоединения для стендовых испытаний

Материал манжеты	Номера втулок	Материал втулки
Серийная резина ИРП–1068	1–5	Сталь 45
	6–10	ТРВ из стали AISI 321с упрочненной рабочей поверхностью Хтв 21
	11–15	ТРВ из стали AISI 321
	16–20	ТРВ из стали AISI 321с упрочненной рабочей поверхностью TiN

4.4. Результаты экспериментальных исследований

4.4.1. Результаты испытаний рабочей поверхности втулок на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы

Для проведения испытаний были изготовлены пластины из стали 45, стали AISI 321 без упрочнения и с упрочнением поверхности ХТВ21 и TiN, шириной 30 мм, длиной 40 мм и толщиной 2 мм с допусками на размеры по 7-му классу точности по ГОСТ 24642–81 [117], ГОСТ 24643–81 [118] и шероховатостью рабочей поверхности не ниже 7-го класса по ГОСТ 2789–73 [109] (рисунок 4.6).

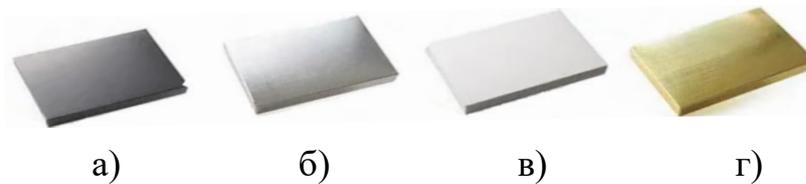


Рисунок 4.6 – Образцы для испытаний: а) сталь 45, б) AISI 321, в) упрочнение ХТВ21, г) упрочнение TiN

При оценке износостойкости предложено использовать абразивный материал, соответствующий материалу, воздействию которому при эксплуатации. Основными элементами пыли, влияющими на абразивный износ деталей агрегатов сельскохозяйственной техники, являются кварц и оксид алюминия. Для проведения испытаний составили смесь, состоящую из 87 % кварцевого песка с микротвердостью 10500–11300 МПа (ГОСТ 2138–91) и 13 % оксида алюминия зернистостью 16–II с микротвердостью 22000–24000 МПа (ГОСТ 3647–80) [120,121].

Испытания проведены для 3 эталонных образцов и 3 групп испытуемых образцов (по 3 образца).

Каждый образец устанавливали в держатель испытательной установки и прижимали к ролику с усилием $(44,1 \pm 0,25)$ Н. Частота вращения ролика составляла $n = 60 \pm 2$ мин⁻¹ (об/мин). Непрерывную подачу абразивного материала в зону трения обеспечивало дозирующее устройство.

По завершении испытаний образец промывали в промывочных жидкостях, сушили и затем взвешивали на весах (погрешность не более 0,1 мг).

Испытания исследуемых образцов продолжались в течение времени,

соответствующего количеству оборотов ролика, указанному в таблице 4.6. Испытания образцов из стали 45 проводили до 1800 оборотов ролика. Отсчет оборотов проводили от момента начала подачи абразивного материала.

Плотность материалов, г/см² [130,131]:

- ρ_s сталь 45 = 7,83 г/см²;
- ρ_u сталь AISI321 = 7,9 г/см²;
- ρ_u хром = 7,14 г/см²;
- ρ_u TiN = 5,22 г/см².

Таблица 4.6 – Количество оборотов ролика для испытаний

Материал образца / Микротвердость рабочей поверхности образца, МПа	Количество оборотов ролика
AISI 321/ 4050	1800
ХТВ 21 / 11500–11300	3600
TiN / 18900–21700	3600

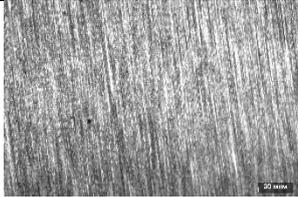
Результаты испытаний приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Оценка износостойкости рабочей поверхности деталей

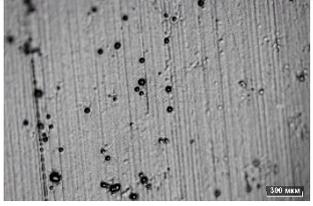
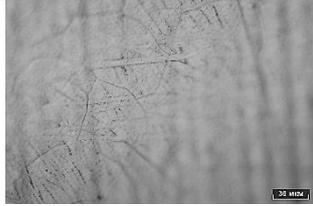
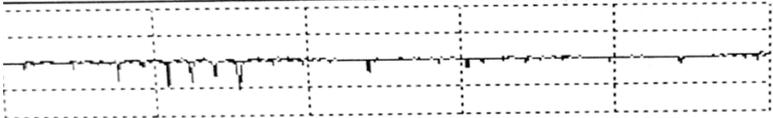
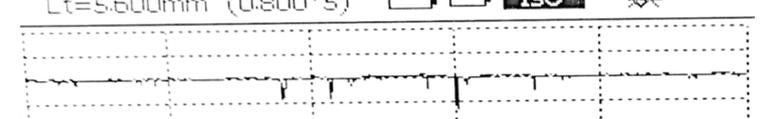
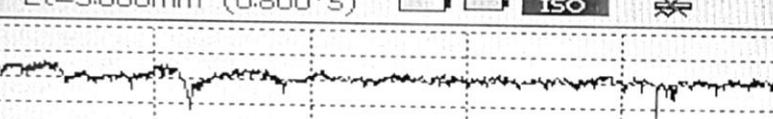
Образец	Потери массы g, мг.	Среднеарифметическое значение g, мг.	Относительная износостойкость (K_u)
Сталь 45	38,2; 40,1; 42,2; 41,0; 43,1	40,9	1
AISI 321	55,4; 55,4; 55,4; 55,5; 55,3	55,4	0,74
ХТВ21	42,4; 42,0; 40,5; 41,8; 41,5	41,6	1,79
TiN	1,6; 1,4; 2,1; 1,8; 1,5	1,7	32,1

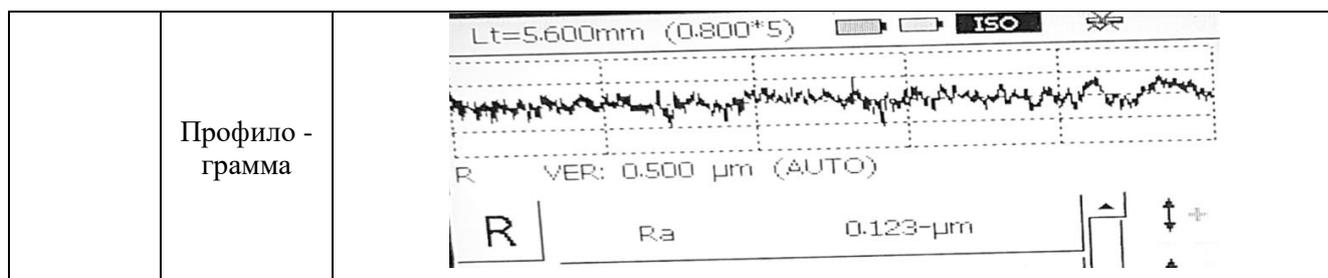
В целях визуализации воздействия абразивного материала на поверхность детали сделаны снимки и сняты профилограммы рабочих поверхностей деталей до и после испытаний. Результаты представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Результаты испытаний

Образец	Поверхность детали		
	×50	×500	×1000
Сталь 45 Новая			

	Профило - грамма	
	После испытаний	
	Профило - грамма	
	Новая	
AISI 321	Профило - грамма	
	После испытаний	
	Профило - грамма	

ХТВ 21	Новая			
	Профилограмма	<p>Lt=5.600mm (0.800*5)   ISO </p>  <p>R VER: 2.500 μm (AUTO)</p> <p>R Ra 0.175-μm   +</p>		
	После испытаний			
	Профилограмма	<p>Lt=5.600mm (0.800*5)   ISO </p>  <p>R VER: 2.500 μm (AUTO)</p> <p>R Ra 0.159-μm   +</p>		
TiN	Новая			
	Профилограмма	<p>Lt=5.600mm (0.800*5)   ISO </p>  <p>R VER: 1.000 μm (AUTO)</p> <p>R Ra 0.162-μm   +</p>		
	После испытаний			



Испытания рабочей поверхности втулок на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы подтвердили утверждение, что износостойкость рабочей поверхности детали зависит от ее твердости. Получены значения относительной износостойкости ($K_{и}$) рабочих поверхностей ТРВ. Экспериментально подтверждено, что в случае, когда критерий твердости $K_T > 0,7$ (для ТРВ с упрочненной поверхностью TiN $K_T = 0,97$ относительно оксида алюминия), то прямое разрушение практически невозможно ($K_{и} = 32,1$), так как контактный выступ частицы разрушится прежде, чем напряжения в деформируемом микрообъеме материала достигнут предельного значения.

4.4.2. Результаты испытаний для определения сил трения и температуры в зоне контакта втулки с манжетой

Испытания проводили с целью определения влияния рабочей поверхности тонкостенной ремонтной втулки на изменение силы трения скольжения в соединении «вал–манжета» согласно методике, изложенной в главе 3. На графиках представлены результаты испытаний для партий из 5 образцов.

Для режимов сухого, граничного и жидкостного трения результаты ускоренных испытаний оценивались по значениям пускового и установившегося усилий трения, температуры в зоне втулки (ТРВ) и манжеты.

Графики изменения значений сил трения и температуры в зоне контакта манжеты с валом при приработке показаны на рисунках 4.7, 4.8.

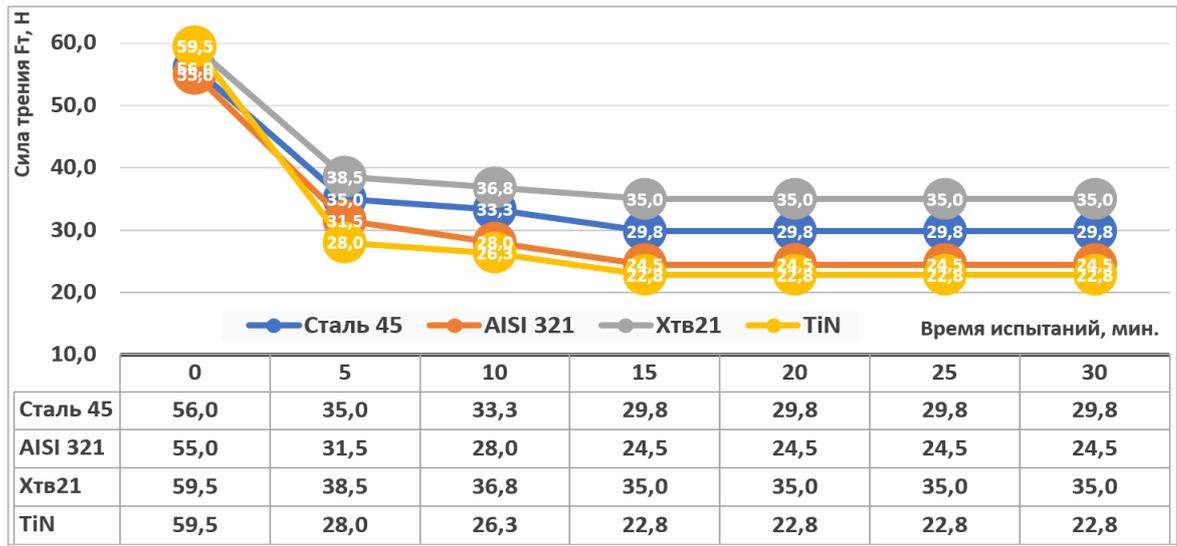


Рисунок 4.7 – Изменение силы трения при приработке

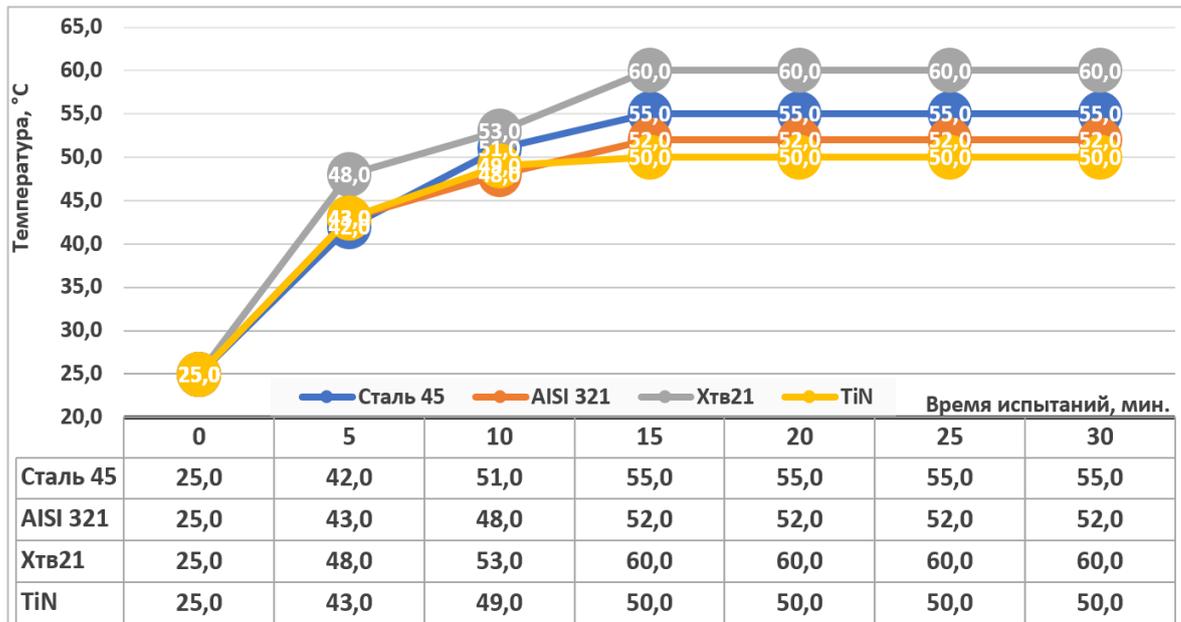


Рисунок 4.8 – Изменение температуры при приработке

При скольжении вала в течение 30 минут по поверхности манжеты при частоте вращения 540 мин^{-1} сила трения $F_{\text{тр.н}}$ достигла минимальных значений. В процессе приработки меньшую силу трения показали образцы ТРВ из стали AISI 321 без упрочнения и ТРВ из стали AISI 321, упрочненные TiN, у которых сила трения уменьшилась по отношению к исходным на 18 и 24% соответственно после 30 минут приработки. Образцы ТРВ, упрочненные Хтв21, показали худший результат ($F_{\text{тр.}}$ увеличилась на 17% относительно исходных образцов).

На этапе приработки проводилось измерение температуры в зоне контакта ТРВ с манжетой. Наибольшая температура наблюдалась в трибосоединении манжета–ТРВ упрочненная Хтв21. Лучшие результаты показали ТРВ из AISI 321 и ТРВ упрочненной TiN.

Величины пускового и установившегося усилий трения в узлах после перерывов в работе показаны на рисунках 4.9–4.12.

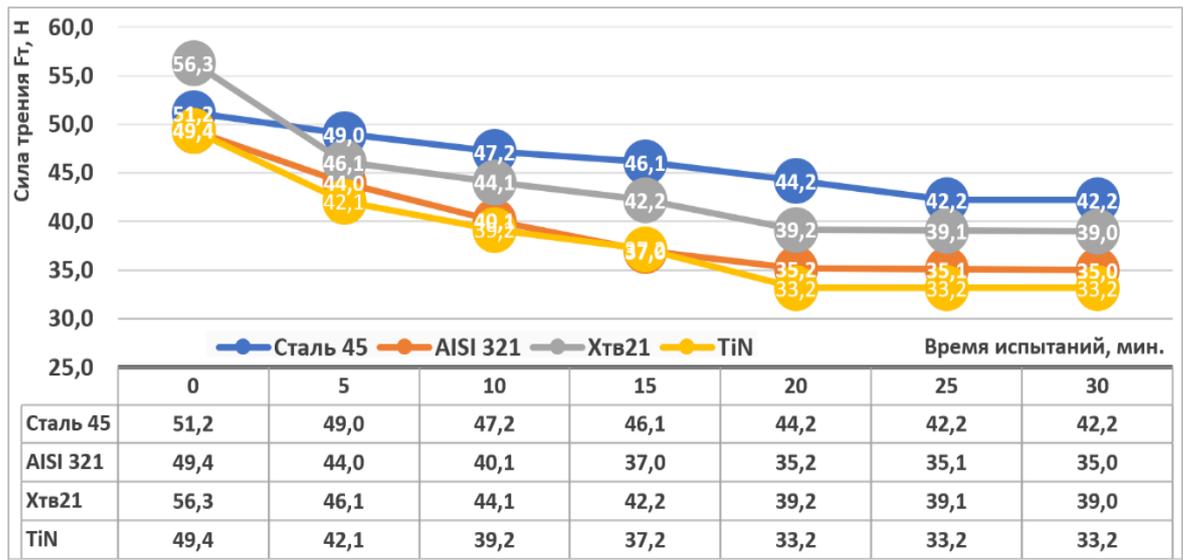


Рисунок 4.9 – Изменение силы трения при перерыве в работе 30 секунд

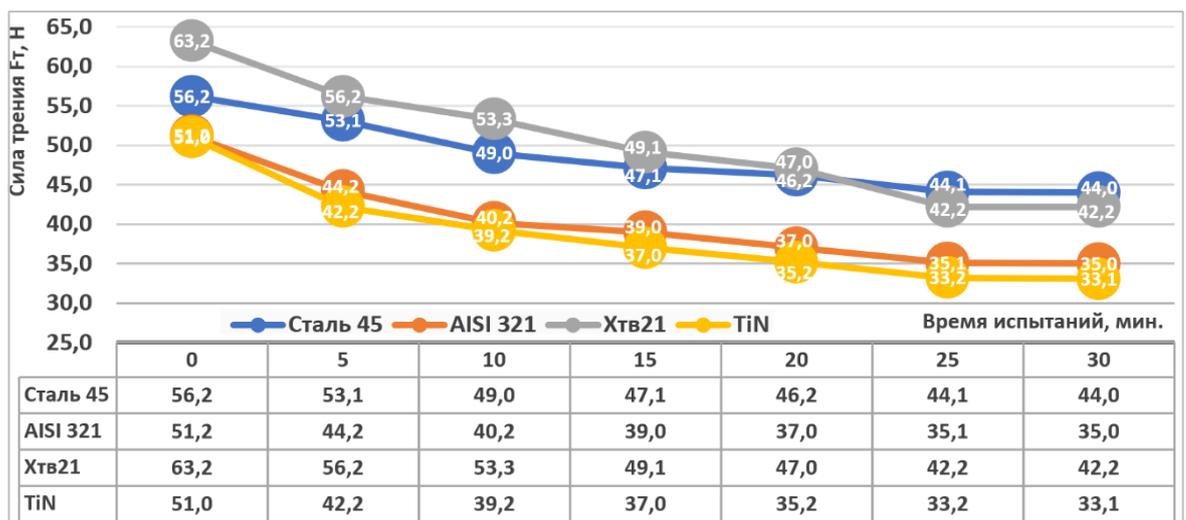


Рисунок 4.10 – Изменение силы трения при перерыве в работе 1 час

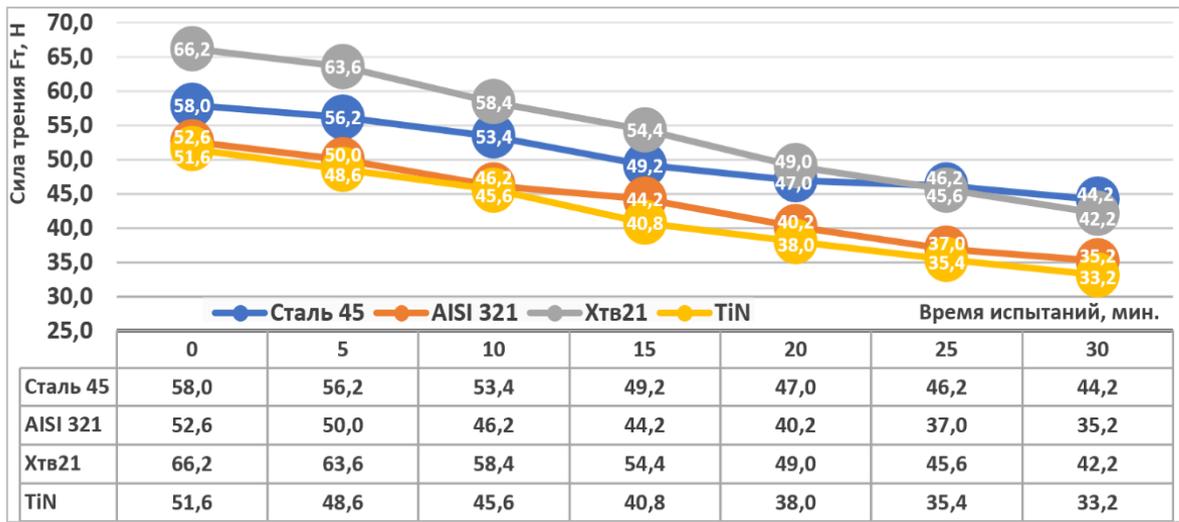


Рисунок 4.11 – Изменение силы трения при перерыве в работе 12 час

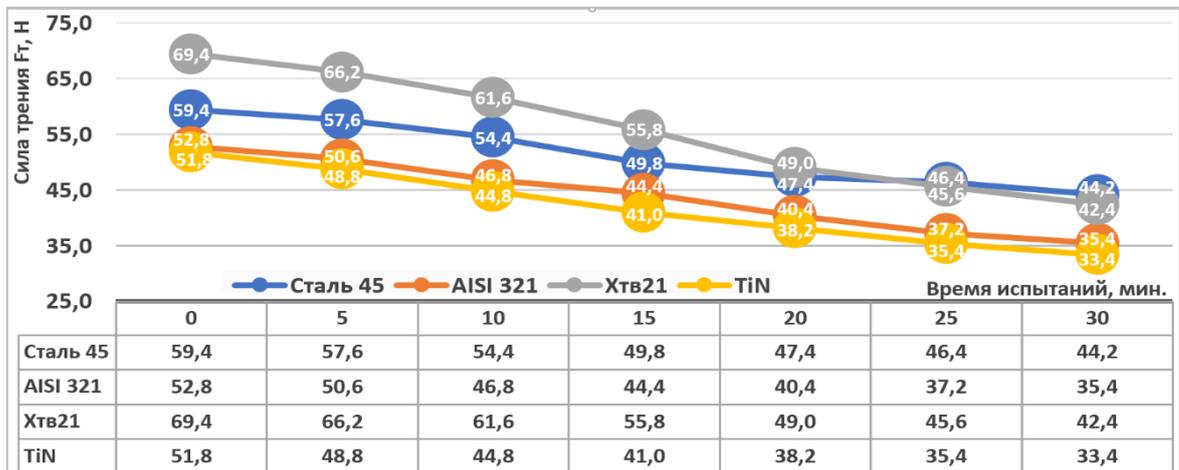


Рисунок 4.12 – Изменение силы трения при перерыве в работе 24 часа

Анализ значений $F_{тр}$ при пуске в узлах трения после неподвижного контакта показывает, что пусковое усилие относительно исходных образцов в трибосоединениях с использованием ТРВ из стали AISI 321 без упрочнения и ТРВ из стали AISI 321, упрочненных TiN, уменьшилось на 10%, а установившаяся сила трения на 33 и 43% соответственно, при этом на втулках с покрытием Хтв21 эти значения увеличились на 12%.

Испытания образцов тонкостенных ремонтных втулок показали, что на всех этапах испытаний при наличии смазки ТРВ из стали AISI 321 без упрочнения и ТРВ из стали AISI 321, упрочненные TiN, имеют лучшие антифрикционные показатели

относительно исходного образца (таблица 4.9). Для тонкостенных ремонтных втулок с рабочей поверхностью упрочненной ХТВ21 значения пусковых усилий и силы трения при работе узла с перерывами увеличиваются в начале скольжения относительно исходных образцов, но через 20 секунд скольжения силы трения в соединении «вал–манжета» становятся меньше, чем у исходных образцов.

Таблица 4.9 – Результаты испытаний определения сил трения и температуры

Величина	Исходные (сталь 45)	Тонкостенные ремонтные втулки/ изменение в % относительно стали 45		
		AISI 321	TiN	ХТВ21
Начальная сила трения, $F_{тр.н}$, Н	56	59,5 (+6%)	59,5 (+6%)	59,5 (+6%)
Установившаяся сила трения, $F_{тр.у}$, Н (через 30 мин. работы)	29,8	24,5 (-22%)	22,8 (-31%)	35 (+17%)
Установившаяся температура, t , °С	55	52 (-6%)	50 (-9%)	60 (+9%)
Сила трения пуска $F_{тр.п}$, Н:				
после 30 с неподвижного контакта	51,2	49,4 (-3,5%)	49,4 (-3,5%)	56,3 (+10,5%)
после 1 ч неподвижного контакта	56,2	51,2 (-10%)	51,0 (-10%)	63,2 (+12%)
после 12 ч неподвижного контакта	56,2	51,2 (-10%)	51,0 (-10%)	63,2 (+12%)
после 24 ч неподвижного контакта	56,2	51,2 (-10%)	51,3 (-9,5%)	63,7 (+13%)
Установившаяся сила трения, $F_{тр.у}$, Н (через 30 с работы):				
после 30 с неподвижного контакта	42,2	35,1 (-20%)	33,2 (-27%)	39 (-8%)
после 1 ч неподвижного контакта	44,0	35,0 (-25%)	33,1 (-33%)	42,2 (-4%)
после 12 ч неподвижного контакта	44,0	35,0 (-25%)	33,1 (-33%)	42,2 (-4%)
после 24 ч неподвижного контакта	47,0	35,2 (-33,5%)	32,9 (-43%)	42 (-12%)

Исходя из результатов испытаний можно сделать вывод, что поверхности ТРВ из стали AISI 321 без упрочнения и ТРВ из стали AISI 321, упрочненные TiN, контактирующие с манжетами, позволяют создавать и удерживать длительное время масляную пленку, что является одним из основных показателей, влияющим на антифрикционные свойства в трибосоединениях «вал–манжета». Рабочая поверхность втулки из стали AISI 321 с поверхностным упрочнением ХТВ21 плохо удерживает смазочный материал в зоне контакта, что приводит к работе трибосоединения в условиях сухого трения в начале скольжения и граничного трения при недостатке смазки в зоне контакта во время работы агрегата.

Испытания партий образцов тонкостенных ремонтных втулок в критических условиях эксплуатации (масляного «голодания») проводились в течение 30 минут. Изменение $F_{тр}$ при работе агрегата в условиях граничного трения ведет к увеличению температуры в зоне контакта манжеты с валом. В этих условиях

лучшие показатели имеют ТРВ из стали AISI 321 без упрочнения и ТРВ из стали AISI 321, упрочненные TiN. График изменения температуры в зоне контакта манжеты и вала показан на рисунке 4.13.

В ходе испытаний определены значения пускового усилия трения в узле в экстремальных условиях эксплуатации – сухом режиме трения (отсутствие масла). Пусковое усилие при сухом режиме трения уменьшилось относительно исходного образца для: ТРВ Хтв21 на 2%; ТРВ AISI 321 – 5%; ТРВ TiN – 8%.

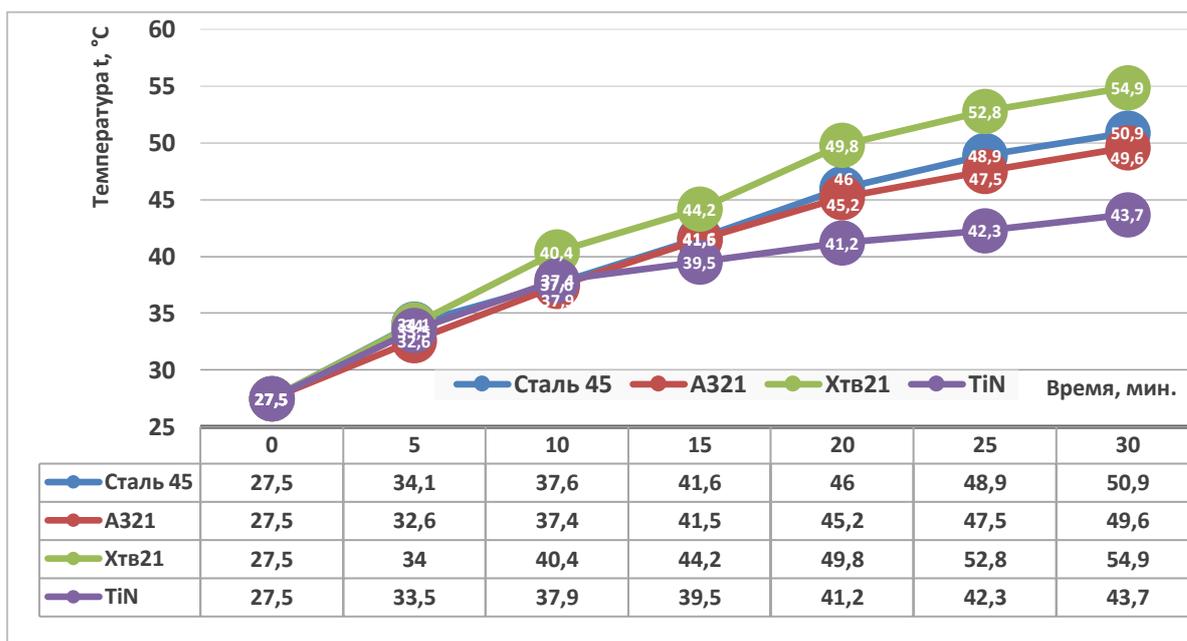


Рисунок 4.13 – Изменение температуры при работе в условиях граничного трения

Тонкостенные ремонтные втулки, изготовленные из стали AISI 321 без упрочнения, и ТРВ из стали AISI 321, упрочненные TiN, показали трибологические свойства превосходящие свойства исходных образцов на всех этапах ускоренных испытаний - по силе трения пуска до 10%, по установившейся силе трения до 33 и 43 % соответственно.

При электролитическом способе нанесения упрочняющего покрытия получается «гладкая» рабочая поверхность (уменьшается Ra). Рабочая поверхность втулки (ТРВ Хтв21) не позволяет удерживать длительное время масляную пленку в зоне контакта, что ведет к работе в условиях сухого или граничного трения.

4.4.3. Результаты испытаний для определения износостойкости исследуемых соединений

В ходе проведения стендовых испытаний исследовалась динамика изнашивания тонкостенных ремонтных втулок с различными рабочими поверхностями, уплотняющих кромок манжет и соединений в целом. Стендовые испытания проводили согласно методике, изложенной в третьей главе.

На первом этапе проведены испытания соединений «вал–манжета» с эталонной втулкой для установления временных параметров ступеней испытаний.

Установлены следующие ступени испытаний:

- приработочная ступень – до стабилизации сил трения и температуры (2 ч);
- нормальная ступень – за время испытаний (32 ч).

Определены временные параметры для нормальной ступени длительных стендовых испытаний соединения «вал–манжета»: 9, 18, 32 ч.

На втором этапе проведены испытания трех видов ремонтных втулок по установленным параметрам первого этапа испытаний и определены износ рабочей поверхности ТРВ и кромок манжет для этих соединений.

Для проведения испытаний была использована партия манжет (таблица 4.10).

Таблица 4.10 – Манжеты, применяемые для испытаний

Партия 1 – 5	Партия 6 – 10	Партия 11 – 15	Партия 16 – 20
Внутренний диаметр манжет D_0 , мм			
42,504; 42,412; 42,681; 42,554; 42,101	42,564; 42,369; 42,714; 42,586; 42,602	42,581; 42,180; 42,358; 42,241; 42,575.	42,620; 42,475; 42,529; 42,636; 42,426
Размах выборки $X_{\min} = 42,101$ $X_{\max} = 42,681$	Размах выборки $X_{\min} = 42,369$ $X_{\max} = 42,714$	Размах выборки $X_{\min} = 42,180$ $X_{\max} = 42,581$	Размах выборки $X_{\min} = 42,426$ $X_{\max} = 42,636$
Среднее значение, \bar{x} 42,45	Среднее значение, \bar{x} 42,567	Среднее значение, \bar{x} 42,387	Среднее значение, \bar{x} 42,537
Среднеквадратическое отклонение, S_x 0,195	Среднеквадратическое отклонение, S_x 0,112	Среднеквадратическое отклонение, S_x 0,166	Среднеквадратическое отклонение, S_x 0,081
Коэффициент вариации, v , % 0,46	Коэффициент вариации, v , % 0,26	Коэффициент вариации, v , % 0,39	Коэффициент вариации, v , % 0,19

В ходе проведения испытаний установлены зависимости износа соединения «вал–манжета» от основных показателей рабочей поверхности ТРВ

(шероховатость и твердость) при работе в различных условиях эксплуатации. При отсутствии абразивных частиц в смазочном материале общий износ в соединении оценивался по износу манжет в данных соединениях (рисунок 4.14). Относительно эталонного образца соединения (штулка из стали 45) износ образца с ТРВ упрочненной ХТВ21 составил 95%, образца с ТРВ упрочненной TiN – 44%, и образца с ТРВ из стали AISI 321 без упрочнения – 30%.

При работе в условиях наличия абразивных частиц в смазочном материале износ в соединении оценивали по износу манжет и ТРВ в данных соединениях (рисунки 4.15, 4.16).

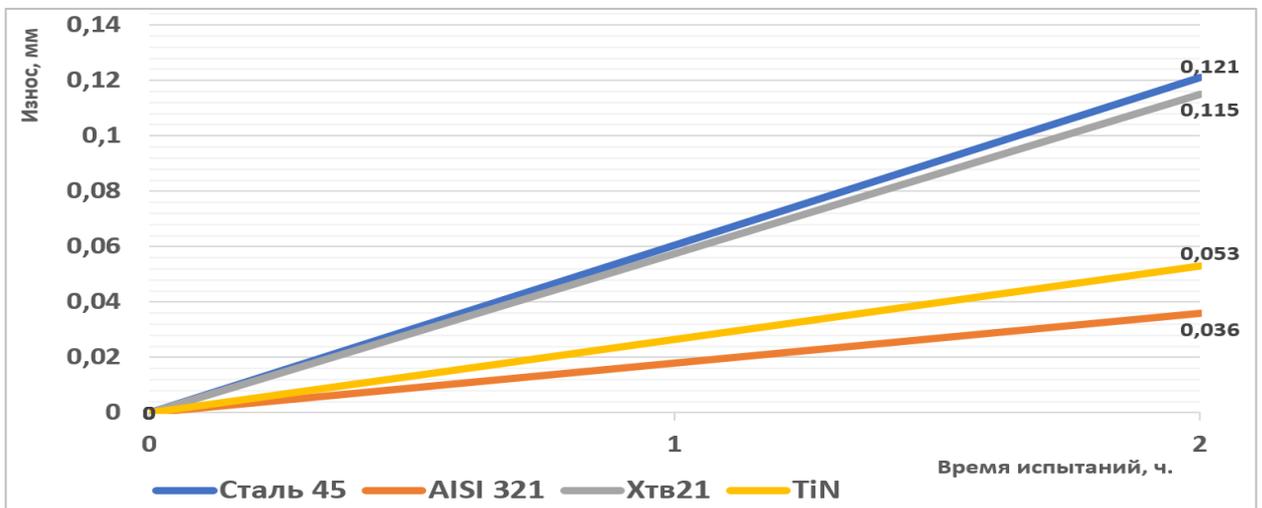


Рисунок 4.14 – Износ манжет при отсутствии абразива в смазочном материале

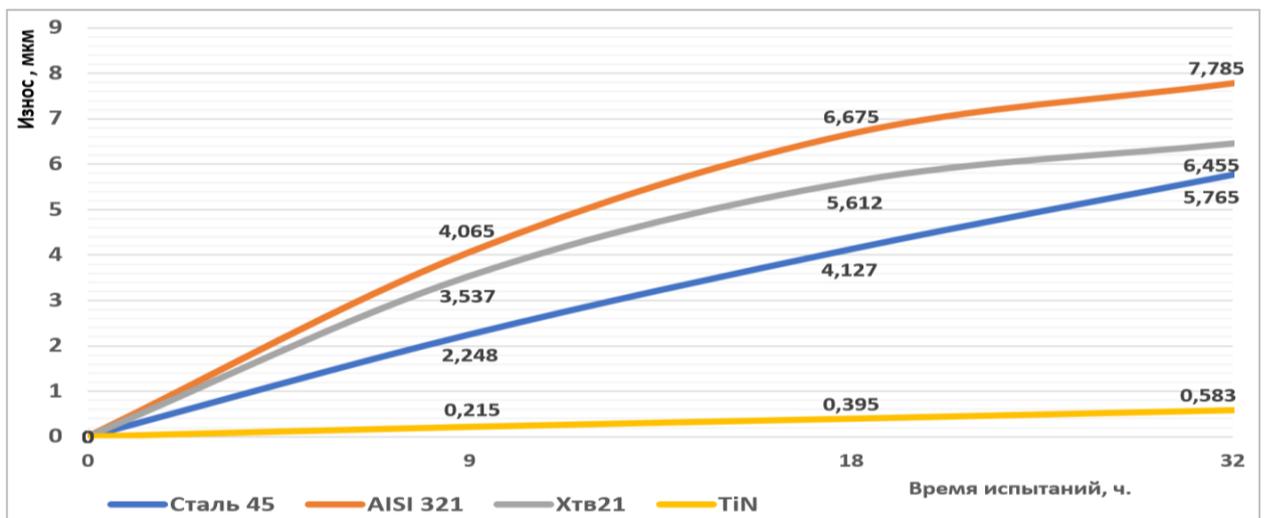


Рисунок 4.15 – Износ ТРВ при наличии абразива в смазочном материале

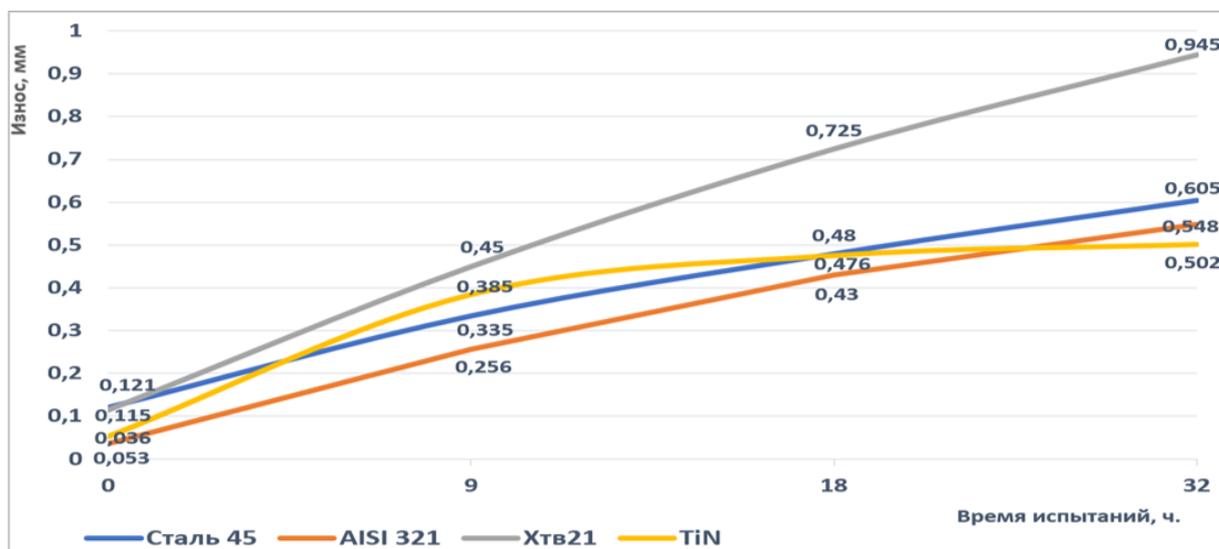


Рисунок 4.16 – Износ манжет при наличии абразива в смазочном материале

Относительно эталонного образца (штулка из стали 45) износ ТРВ упрочненной TiN составил 10 %, ТРВ упрочненной Хtv21 – 112 %, ТРВ из стали AISI 321 без упрочнения – 135 % [107]. Относительно эталонного образца соединения (манжета с втулкой из стали 45) износ манжеты с ТРВ упрочненной TiN составил 83%, манжеты с ТРВ из стали AISI 321 без упрочнения – 91%, и манжеты с ТРВ упрочненной Хtv21 – 156% [107].

Данные, полученные в ходе эксперимента, показывают, что износостойкость трибосоединения «вал–манжета» относительно эталонного образца (рисунок 4.17):

- с ТРВ с поверхностным упрочнением TiN увеличилась на 22%;
- с ТРВ из нержавеющей стали AISI 321 без упрочнения рабочей поверхности увеличилась на 10%;
- с ТРВ с поверхностным упрочнением Хtv21 снизилась на 64% [107].

На каждой ступени испытаний первого и второго этапов для определения износа манжет проведены измерения $D_{вн}$ манжет и профилометрия рабочих поверхностей втулок в восьми равноотстоящих участках рабочей поверхности образца в радиальном направлении, обработанные результаты приведены в приложении Г.

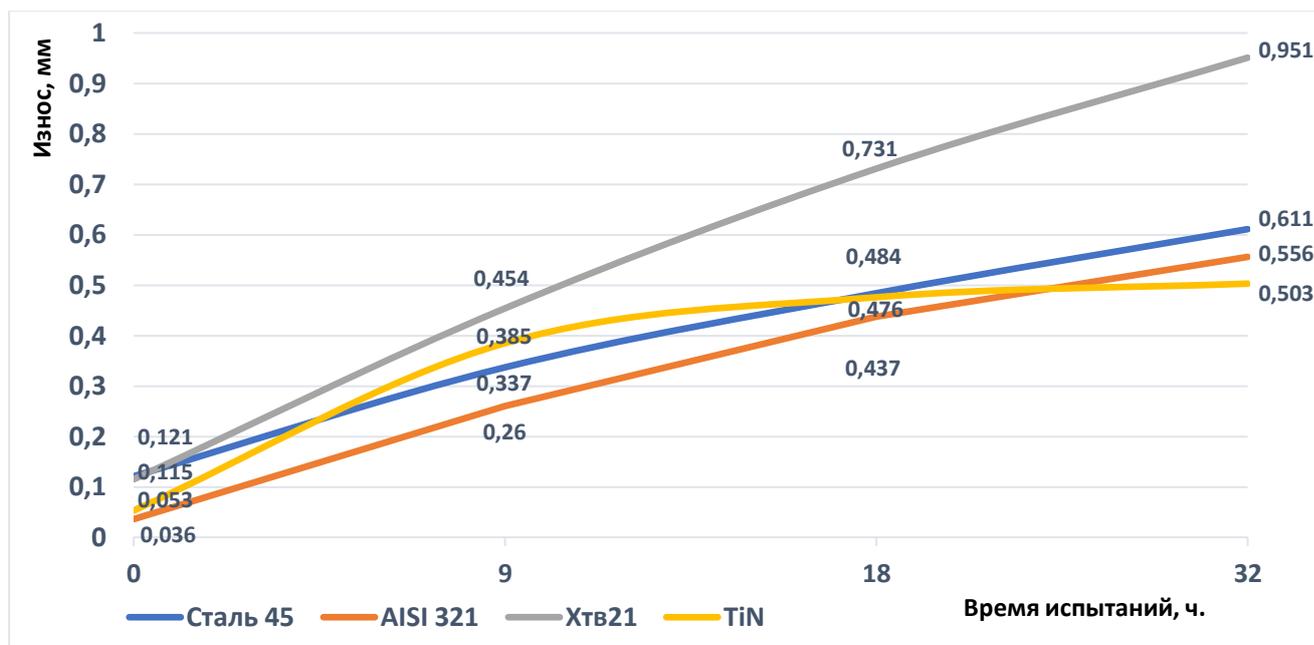


Рисунок 4.17 – Износ соединения «вал–манжета»

Итоговые результаты испытаний приведены в таблице 4.11.

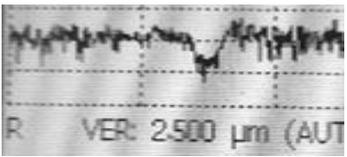
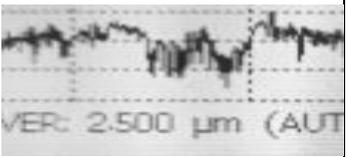
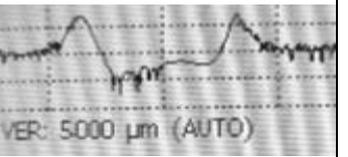
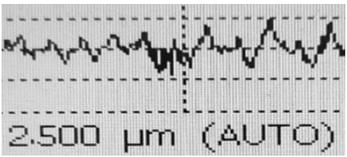
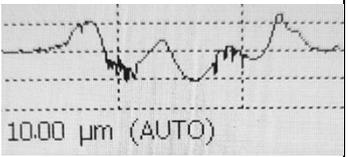
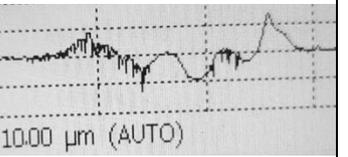
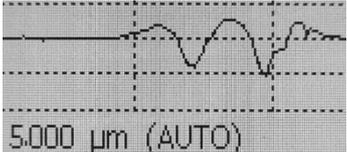
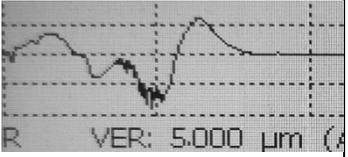
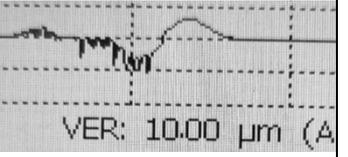
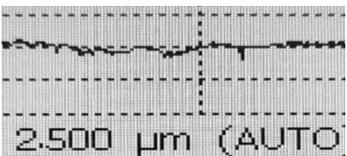
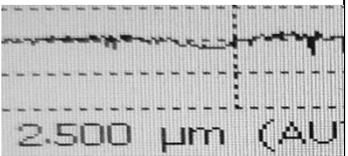
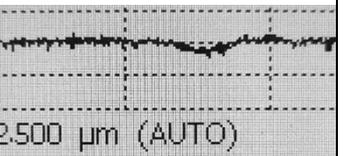
Таблица 4.11 – Износ деталей соединения «вал–манжета» [107].

Соединение	Детали	Wп., мм	W9, мм	W18, мм	W32, мм	Суммарный износ
1	Втулка Ст45	нет	0,002248	0,004127	0,005765	0,611 мм
	Манжета	0,121	0,335	0,48	0,605	
	Соединение	0,121	0,337	0,484	0,611	
2	ТРВ (TiN)	нет	0,000215	0,000395	0,000583	0,503 мм
	Манжета	0,053	0,385	0,476	0,502	
	Соединение	0,053	0,385	0,476	0,503	
3	ТРВ (XТВ21)	нет	0,003537	0,005612	0,006455	0,951 мм
	Манжета	0,115	0,45	0,725	0,945	
	Соединение	0,115	0,454	0,731	0,951	
4	ТРВ (AISI 321)	нет	0,004065	0,006675	0,007785	0,556 мм
	Манжета	0,036	0,256	0,43	0,548	
	Соединение	0,036	0,26	0,437	0,556	

В ходе испытаний проводилось исследование влияния абразивных частиц на рабочую поверхность деталей. Экспериментально подтверждено, что если твердость абразивной частицы превышает твердость основного металла детали, то при контакте происходит пластическое отеснение (смещение) материала. Профилограммы рабочих поверхностей при различной наработке наглядно показывают процесс формирования канавок в зоне контакта манжеты и вала при

наличии в смазке абразива (таблица 4.11). Подтверждено, что разрушение рабочей поверхности с критерием твердости $K_T > 0,7$ практически не происходит (K_T для ТРВ упрочненной TiN составляет 0,97) [107].

Таблица 4.12 – Формирование канавки в зоне контакта манжеты и вала

Вид детали	Длительность испытаний			Значение K_T для Al_2O_3
	9 ч	18 ч	32 ч	
Втулка сталь 45				0,38
ТРВ AISI 321				0,19
ТРВ Хтв21				0,55
ТРВ TiN				0,97

Полученные экспериментальные данные подтверждают, что шероховатость поверхности детали и ее твердость являются основными факторами, влияющими на износостойкость рабочей поверхности ТРВ.

Подтверждено, что при увеличении микротвердости рабочей поверхности детали, превышающей значение $0,7H_a$ (H_a - твердость абразивной частицы), износ рабочей поверхности практически не происходит. Износ рабочей поверхности ТРВ с поверхностным упрочнением TiN составил 10% от износа втулки, изготовленной по ГОСТ 8752–79.

ТРВ из стали AISI 321 без упрочнения рабочей поверхности при отсутствии абразива в смазочном материале показал уменьшение износа на 70% относительно

эталонного образца за счет лучшего микрорельефа рабочей поверхности, позволяющего создавать и удерживать длительное время масляную пленку, что является одним из основных показателей, влияющим на антифрикционные свойства в трибосоединениях «вал–манжета».

Износостойкость трибосоединений «вал–манжета», состоящих из манжеты и ТРВ с поверхностным упрочнением TiN, относительно эталонного образца увеличилась на 22%, из манжеты и ТРВ из стали AISI 321 без упрочнения рабочей поверхности – на 10%.

Износ в соединении «вал–манжета», включающем ТРВ из стали AISI 321 без упрочнения рабочей поверхности сопоставим с износом соединения «вал–манжета», включающего ТРВ с упрочненной поверхностью TiN (увеличение на 10%), что позволяет использовать ее в качестве ремонтной детали без проведения дополнительных работ по упрочнению рабочей поверхности.

«Гладкая» рабочая поверхность ТРВ с поверхностным упрочнением Хтв21 плохо удерживает смазочный материал в зоне контакта, что приводит к работе трибосоединения в условиях граничного трения при недостатке смазки в зоне контакта во время работы агрегата и ведет к износу детали и сопряженной с ней манжеты.

4.4.4. Результаты эксплуатационных испытаний тонкостенных ремонтных втулок

Эксплуатационные испытания тонкостенных ремонтных втулок проводятся с 1 февраля 2025 года с целью проверки их работоспособности в реальных условиях эксплуатации. Оценивается влияние различных факторов (условий работы, режимов работы, качества смазочного материала) на процессы изнашивания в трибосоединении, прочностные характеристики ТРВ, ресурс деталей.

Исследования проводятся на базе предприятия СПК «КОЛОС». Тонкостенные ремонтные втулки установлены на полуосевые шестерни передних ведущих мостов тракторов БЕЛАРУС – 82.

За период испытаний с 1 февраля 2025 года по 15 июля 2025 года (700 м/ч) утечек смазочного материала не выявлено, все соединения находятся в работоспособном состоянии и пригодны к дальнейшей эксплуатации, что подтверждается актом эксплуатационных испытаний тонкостенных ремонтных втулок (приложение Г).

Эксплуатационные испытания продолжаются.

Полученные промежуточные результаты испытаний в реальных условиях эксплуатации показали, что ТРВ могут использоваться при ремонте техники, обеспечивая восстановление работоспособности соединения «вал–манжета».

4.5. Выводы

Экспериментально подтверждено, что в случае, когда критерий твердости $K_T > 0,7$ (для ТРВ с упрочненной поверхностью TiN $K_T = 0,97$ относительно оксида алюминия), то прямое разрушение практически невозможно ($K_H = 32,1$).

Тонкостенные ремонтные втулки, изготовленные из стали AISI 321 без упрочнения, и ТРВ из стали AISI 321 с упрочнением TiN, показали трибологические свойства превосходящие свойства эталонных образцов по силе трения пуска до 10%, по установившейся силе трения до 33 и 43 % соответственно.

Износ рабочей поверхности ТРВ с поверхностным упрочнением TiN составил 10% от износа втулки, изготовленной по ГОСТ 8752–79.

ТРВ из стали AISI 321 без упрочнения рабочей поверхности при отсутствии абразива в смазочном материале показал уменьшение износа на 70% относительно эталонного образца за счет лучшего микрорельефа рабочей поверхности.

Износостойкость трибосоединений «вал–манжета», состоящих из манжеты и ТРВ с поверхностным упрочнением TiN, относительно эталонного образца увеличилась на 22%, из манжеты и ТРВ из стали AISI 321 без упрочнения рабочей поверхности – на 10%.

По результатам эксплуатационных испытаний за 700 мото-ч утечек смазочного материала в соединении «вал–манжета» не выявлено, все соединения находятся в работоспособном состоянии.

ГЛАВА 5. РАСЧЕТНЫЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

В настоящее время ремонтные втулки для соединения «вал–манжета» выпускают несколько компаний: группа компаний SKF (Швеция), Dichtomatik (Германия) и др. Серьезным препятствием использования втулок от иностранных производителей является прекращение импорта и их высокая стоимость. По состоянию на апрель 2025 г. средняя стоимость втулки Speedi-Sleeve составляет 9547 руб. [132,133, 134].

Для определения экономической эффективности проведен расчет изготовления тонкостенной ремонтной втулки [102].

Применяемое оборудование и оснастка.

Токарный станок FAVTEC СК6136/750 с ЧПУ Siemens 808D [136].

Технические характеристики станка:

- Система ЧПУ– Siemens 808D;
- Ход по оси X (мм) – 200;
- Ход по оси Z (мм) – 750;
- Максимальный диаметр заготовки (мм) – 360;
- Диаметр обработки над суппортом (мм) – 190;
- Скорость вращения шпинделя (мин^{-1}) – 2500;
- Проходное отверстие шпинделя мм – 52;
- Крутящий момент шпинделя, (Н·м) – 6;
- Размер зажимного патрона (мм) – 200;
- Мощность двигателя (кВт) – 5,5.

Используемая оснастка:

- Токарный патрон с ручным зажимом (ГОСТ 2675–80);
- Державка для наружного точения SSKCR2020K09;
- Державка отрезная B-DGTR1212J–2D30;
- Державка расточная S25S–СКUNR16;
- Пластина для точения SMNG090304–GF IP4015;
- Пластина для точения DCMT070202 UE6020;

– Пластина для отрезки и обработки канавок DGN1502J IC908.

Итоговая себестоимость детали:

$$C_{\text{п}} = \frac{(П_3 + В_3)}{O_{\text{вп}}}, \quad (5.1)$$

где

$C_{\text{п}}$ – себестоимость производства;

$П_3$ – прямые затраты – затраты на материал, электроэнергию, амортизацию станков;

$В_3$ – временные затраты – зарплата рабочего и соц. выплаты;

$O_{\text{вп}}$ – объем выпущенной продукции.

Данные для расчета внутризаводской цены детали приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Расчет стоимости заготовки ТРВ

№ п.п.	Статьи затрат и их расчет	Изделие
		ТРВ
1. Основные материалы за вычетом возвратных отходов		
1.1	Масса материала, кг	0,16
1.2	Плановая цена одного килограмма материала, руб.	429,45
1.3	Затраты на приобретение килограмма материала, руб.	472,395
1.4	Масса возвратных отходов, кг	0,15
1.5	Цена одного килограмма отходов, руб.	2,3
1.6	Стоимость возвратных отходов, руб.	0,345
1.7	Итого затраты на материал за вычетом возвратных отходов, руб.	75,235
2. Заработная плата основных производственных рабочих		
2.1	Прямая заработная плата, руб.	63,48
2.2	Доплаты и премии, %	60
	Доплаты и премии, руб.	38
2.3	Основная заработная плата, руб.	101,5
2.5	Социальные начисления на ЗП, %	30
	Социальные начисления на ЗП, руб.	30,4
Итого полная себестоимость, руб.		343,7
7.	Предполагаемый норматив рентабельности изделия, %	25
8.	Прогнозируемая прибыль, руб.	85,93
9.	Внутризаводская цена, руб.	429,7

Экономический расчет изготовления детали показал, что стоимость заготовки тонкостенной ремонтной втулки будет составлять около 430 руб. Эта деталь может использоваться самостоятельно в качестве ТРВ для проведения срочного ремонта в полевых условиях. Для обеспечения длительной работы восстановленного соединения «вал–манжета» предлагается использование ТРВ с поверхностью упрочненной TiN. ООО «ВМ–Технологии» предоставило расчет себестоимости упрочнения ТРВ методом PVD, которая составила 150 руб. на одну деталь.

Для обеспечения восстановления работоспособности соединения «вал–манжета» может использоваться два вида ТРВ:

- из стали AISI 321 без упрочнения рабочей поверхности (цена 430 руб.);
- из стали AISI 321 с упрочнением рабочей поверхности TiN (цена 580 рублей).

Цена тонкостенной ремонтной втулки отечественного производства составляет 1/16 стоимости втулок иностранных производителей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ методов восстановления рабочей поверхности вала в соединении «вал–манжета» подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники показал, что наиболее перспективным является использование упрочненной тонкостенной ремонтной втулки. Перспективным методом упрочнения является осаждение нитридов титана методом PVD.

2. Теоретически установлена оптимальная толщина стенки втулки в пределах 0,2...0,8 мм, обеспечивающая функциональный натяг в соединении «вал–манжета». Определен минимальный уровень упрочнения рабочей поверхности втулки для подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники – 14700 МПа.

3. Экспериментально установлено:

– тонкостенные ремонтные втулки из стали AISI 321 без упрочнения и ТРВ с упрочненной поверхностью TiN показали трибологические свойства превосходящие свойства эталонных образцов по силе трения пуска до 10%, по установившейся силе трения до 33 и 43 % соответственно;

– износ рабочей поверхности ТРВ с упрочненной поверхностью TiN составил 10% от износа эталонной образца;

– износостойкость трибосоединения, состоящего из манжеты и ТРВ из стали AISI 321 без упрочнения относительно эталонного образца, увеличилась на 10%, а трибосоединения, состоящего из манжеты и ТРВ с упрочненной поверхностью TiN, увеличилась на 22%.

4. Разработана технология изготовления тонкостенной ремонтной втулки.

5. По результатам эксплуатационных испытаний за 700 мото-ч утечек смазочного материала в соединении «вал–манжета» не выявлено, все соединения находятся в работоспособном состоянии.

6. Стоимость ТРВ из стали AISI 321 без упрочнения составила 430 руб., из стали AISI 321 с упрочнением TiN – 580 руб., что составляет 1/16 стоимости втулки иностранных производителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов, В. Н. Инновационное машиностроение как фактор развивающего импортозамещения / В. Н. Борисов, О. В. Почукаева // Проблемы прогнозирования. – 2015. – № 3(150). – С. 31-42. – EDN UAXLHD.
2. Цукерман, В. А. О политике импортозамещения промышленного производства Севера и Арктики / В. А. Цукерман, А. А. Козлов // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2017. – № 1(52). – С. 113-121. – EDN YLEPEL.
3. Лукиенко, Л.В. Анализ отказов эксплуатируемой сельскохозяйственной техники российского производства / Л.В. Лукиенко // Агропродовольственная экономика. - 2024. - № 5. - С. 7-11. – EDN FCXNKK.
4. Мельников, О. М. Повышение работоспособности уплотнительных устройств подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники: специальность 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мельников Олег Михайлович. – Москва, 2020. – 21 с. – EDN YAJOJA.
5. Управление качеством в сельском хозяйстве / В. И. Черноиванов, А. А. Ежевский, Н. В. Краснощеков, В. Ф. Федоренко. – Москва: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2011. – 344 с. – ISBN 978-5-7367-0825-3. – EDN KPODRZ.
6. Федоренко, В. Ф. Ресурсосбережение в АПК: Научное издание / В. Ф. Федоренко. – Москва: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2012. – 384 с. – ISBN 978-5-7367-0897-0. – EDN WERIMV.
7. Повышение эффективности использования машинно-тракторного парка в современных условиях: науч. издание / В.Ф. Федоренко, А.А. Ежевский,

С.А. Соловьев и др. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2015. – 336 с. - ISBN: 978-5-7367-1097-3.

8. Мельников, О.М. Оценка показателей качества деталей и соединения «вал–манжета» / О.М. Мельников, С.П. Казанцев, О.В. Чеха // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». – 2019. – № 5 (93). – С. 8–13. DOI 10.34677/1728–7936–2019–5–8–13.

9. Исследование скоростных и нагрузочных режимов в рядовых условиях эксплуатации, отказов и дефектов деталей редукторных элементов трансмиссий сельхозмашин: отчет о НИР. – М.: МИИСП им. В.П. Горячкина, 1988. – 71 с.

10. Леонов, О.А. Повышение долговечности подвижных соединений «вал–уплотнение» оптимизацией точностных параметров (на примере редукторов картофелеуборочных комбайнов): дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / Леонов Олег Альбертович. – М., 1994. – 150 с.

11. Мельников, О.М. Работоспособность соединений "вал–манжета" и повышение их надежности / О.М. Мельников // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». – 2018. – № 2 (84). – С. 50–54. DOI 10.26897/1728–7936–2018–2–50–54.

12. Гржибовский, С. П. Эксплуатационные и лабораторные исследования влияния загрязнений рабочей жидкости на износ деталей гидравлических систем тракторов: автореферат дис... канд. техн. наук. / Латв. с.-х. акад. – Елгава, 1972. — 22 с.

13. Работоспособность технических систем: учебник для ВУЗов по изучению дисциплины / С. К. Тойгамбаев, О. Н. Дидманидзе, А. С. Апатенко [и др.]. – Москва: РГАУ - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2022. – 379 с. - ISBN: 978-5-9973-6373-4.

14. Ерохин, М.Н. Детали машин: учебник / М.Н. Ерохин, С.П. Казанцев. – М.: ТРАНСЛОГ, 2018.– 410 с. - ISBN: 978-5-905563-805, 978-5-905563-85-0.

15. Леонов, О.А. Предельное состояние соединений «вал–уплотнение» / О.А. Леонов // Технический сервис в агропромышленном комплексе: сборник

научных трудов Московского государственного агроинженерного университета имени В.П. Горячкина. – М., 1998. – С. 25–31.

16. Нестеркин, Г. А. Нормированные требования к качеству манжет, валов и их соединений / Г. А. Нестеркин // Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении: IV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов, Тула, 18-20 апреля 2023 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2023. – С. 146-148. – EDN QPFKRS.

17. Голубев, А.И. Уплотнения и уплотнительная техника: справочник / А.И. Голубев, Л.А. Кондаков. – М.: Машиностроение, 1986. – 464 с.

18. Детали машин: Атлас конструкций: учебное пособие для студентов машиностроительных специальностей вузов. В 2-х частях. Ч. 2; 5-е издание, перераб. и доп.; под общей ред. д-ра техн. наук проф. Д.Н. Решетова. – М.: Машиностроение, 1992.

19. Кононенко, А.П. Уплотнительные устройства машин и машиностроительного оборудования / А.П. Кононенко, Ю.Н. Голубев. – М.: Машиностроение, 1984. – 103 с.

20. Събеев, С.Г. Уплотнения / С.Г. Събеев, З.П. Дренчев. – София: Техника, 1969. – 218 с.

21. Голубев, А.И. Торцевые уплотнения вращающихся валов. 2-е изд., перераб. и доп. / А.И. Голубев. – М.: Машиностроение. 1974. – 212 с.

22. Майер, Э. Торцовые уплотнения / Пер. с нем. / Э. Майер. – М.: Машиностроение, 1978. – 288 с.

23. Коморницкий-Кузнецов, В.К. Исследования фрикционных характеристик уплотнений вращающихся валов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 02.00.07 / Коморницкий-Кузнецов Валентин Кронидович. – М., 1973. – 19 с.

24. Каталог деталей и сборочных единиц тракторов «Беларус» МТЗ 80/82. – Мн.: Ураджай, 1974. – 312 с.

25. Житомирский, В.К. Уплотнения / В.К. Житомирский. – М.: Машиностроение, 1964. – 154 с.

26. Контактные уплотнения вращающихся валов. / Г.А. Голубев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1976. – 264 с.
27. Хрусталеv, А.А. Уплотнения вращающихся валов / А.А. Хрусталеv, В.А. Булкин, Ю.А. Дулатов. – Казань, 1978. – 39 с.
28. Попов, В.Н. Исследование работоспособности и выбор рациональных способов восстановления деталей уплотнительных узлов сельскохозяйственных тракторов: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / Попов Виктор Николаевич. – Л.: Пушкин, ЛСХИ, 1975. – 303 с.
29. Баусов, А.М. Комбинированные магнитожидкостные уплотнения подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники: дис. ... докт. техн. наук: 05.20.03 / Баусов Алексей Михайлович. – М., 2004. – 265 с.
30. Повышение эффективности использования машинно–тракторного парка в современных условиях: науч. издание / В.Ф. Федоренко, А.А. Ежеvский, С.А. Соловьев и др. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2015. – 336 с.
31. Детали машин и основы конструирования: учебное пособие для вузов по агроинженерным специальностям/ Под ред. М. Н. Ерохина. – Колос С, 2004, – 462 с.— ISBN 5-9532004-4-7.
32. Белов, М. И. Оценка давления уплотнения на вал / М. И. Белов, М. Н. Ерохин, О. М. Мельников // Агроинженерия. – 2020. – № 2(96). – С. 29-33. – DOI 10.26897/2687-1149-2020-2-29-33. – EDN FNVSIT.
33. Разработка технологического процесса упрочнения поверхностей деталей: метод. указания. / сост. М. И. Чеботарёв, И.Г. Савин – Краснодар: КубГАУ, 2017 – 21 с.
34. Сковородин, В.Я. Долговечность сопряжений деталей отремонтированной сельскохозяйственной техники (на примере сельскохозяйственных тракторов): Дис. ... д-ра техн. наук. Л., Пушкин: ЛСХИ, 1985. - 284 с
35. Исследование влияния параметров макрогеометрии на герметичность соединений вала с манжетой / О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба, Л. А. Гринченко [и

др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2023. – № 6. – С. 40-47. – DOI 10.31857/S0235711923060111. – EDN ETCVUM.

36. Меденко, А. А. Совершенствование системы технического сервиса сельскохозяйственной техники региональными дилерскими центрами: специальность 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / А.А. Меденко, 2022. – 184 с.

37. Игнаткин, И. Ю. Способ восстановления вала редуктора с применением ремонтной детали и полимерных материалов / И. Ю. Игнаткин, А. В. Серов, А. В. Дроздов // Вестник НГИЭИ. – 2021. – № 5(120). – С. 53-64. – DOI 10.24412/2227-9407-2021-5-53-64. – EDN GUBFOE.

38. Ерохин, М. Н. Способы модифицирования поверхностей трения деталей машин / М. Н. Ерохин, С. П. Казанцев, Н. Н. Чупятов. – Москва: Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина, 2014. – 140 с. – ISBN 978-5-86785-295-5. – EDN YOKZJR.

39. Поляк, М.С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения: в 2 т. Т. 2. / М.С. Поляк. – М.: Л.В.М.-СКРИПТ, Машиностроение, 1991. – 688 с. - ISBN: 5-900583-02-3.

40. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: справочник / Г.В. Борисенок, Л.А. Васильев, Л.Г. Ворошнин и др. – М.: Metallurgia, 1981. – 424 с.

41. Кудрявцев, Н.Т. Электролитические покрытия металлами / Н.Т. Кудрявцев. – М.: Химия, 1979. – 352 с.

42. Повышение износостойкости стальных деталей электромеханической обработкой / С. К. Федоров, Л. В. Федорова, Ю. С. Иванова, С. Д. Карпухин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2017. – № 7(151). – С. 305-308. – EDN ZAGTNB.

43. Расчет и выбор посадок с натягом для восстановления поверхности вала под манжету запрессовкой тонкостенных втулок / О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба, Ю. Г. Вергазова [и др.] // Вестник машиностроения. – 2023. – Т. 102, № 12. – С. 990-994. – DOI 10.36652/0042-4633-2023-102-12-990-994. – EDN HWTEJU.

44. Лапаев, А. В. Выбор метода поверхностного упрочнения ремонтной тонкостенной втулки / А. В. Лапаев, О. М. Мельников // *Агроинженерия*. – 2025. – Т. 27, № 2. – С. 77-83. – DOI 10.26897/2687-1149-2025-2-77-83. – EDN NGFXBE.
45. Кузнецов, В.Д. Физика твердого тела. - Томск: Полиграфиздат, 1941–1947, т.2.
46. Хрущов, М.М. Исследование изнашивания металлов. / М.М. Хрущов, М.А. Бабичев. - М.: Изд-во АН СССР. 1960. 350 с.
47. Крагельский, И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968, 342 – 480 с.
48. Львов, П.Н. Износостойкость деталей строительных и дорожных машин. – М.: Машгиз, 1962, 89 с.
49. Зайцев, А.К. Основы учения о трении износе и смазке машин. – М.:Л.: Машгиз, 1947, 256 с.
50. Лаврентьев, А.И. О связи абразивной износостойкости материалов с их физико–механическими свойствами. /А.И. Лаврентьев // *Трение и износ*. Т. I, № 5, 1980, с.878–884
51. Степанова, Т. Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин: учебное пособие / Т. Ю. Степанова. – Иваново: ГОУВПО Ивановский гос. химико-технологический университет, 2009. – 63 с.
52. Ткачев, В.Н. Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин. - М.: Машиностроение, 1971, 166 с.
53. Шлугер, М.А. Гальванические покрытия в машиностроении: справочник: в 2–х т./ Под ред. М.А. Шлугера. – М.: Машиностроение, 1985. – Т.1 – 240с.
54. Соркин, Л.М. Упрочнение деталей борированием. / Л.М. Сорокин. – М.: Машиностроение, 1972. – С. 64.
55. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин/ А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин [и др.] – М: Машиностроение, 1988. – 240 с.

56. Ерохин, М. Н. Диффузионные покрытия в ремонтном производстве / М. Н. Ерохин, С. П. Казанцев, М. Н. Ерохин, С. П. Казанцев; М-во сельского хозяйства Российской Федерации, Федеральное гос. образовательное учреждение высш. проф. образования Московский гос. агроинженерный ун-т им. В. П. Горячкина. – Москва: [ФГОУ ВПО МГАУ], 2006. – 124 с. – ISBN 5-86785-171-0. – EDN QKYHRF.

57. Чудина, О. В. Комбинированные методы поверхностного упрочнения сталей с применением лазерного нагрева: Теория и технология / О. В. Чудина; О.В. Чудина; Моск. автомобил.-дорож. ин-т (Гос. техн. ун-т). – Москва: МАДИ (ГТУ), 2003. – 248 с. – ISBN 5-7962-0030-5. – EDN QNAOHJ.

58. Сафонов, А.Н. Лазерные методы термической обработки в машиностроении: учебное пособие / А.Н. Сафонов, А.Г. Григорьянц. – М: Машиностроение, 1986. – 48 с.

59. Григорьянц, А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М: Машиностроение, 1989. – 304 с. – ISBN: 5-217-00432-0.

60. Электроискровое легирование металлических поверхностей / А.Е. Гитлевич, В.В. Михайлов, Н.Я. Парканский [и др.] – Кишинев: Штиинца, 1985.

61. Лазерное и электроэрозионное упрочнение материалов / В.С. Коваленко, А.Д. Верхотуров, Л.Ф. Головкин [и др.]. – М: Наука, 1986. – 276 с.

62. Немилов, Е.Ф. Справочник по электроэрозионной обработке материалов. – Л: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1989. – 164 с.

63. Газотермическое напыление композиционных порошков / А.Я. Кулик, Ю.С. Борисов, А.С. Мнужин. – Л: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1985. – 200 с.

64. Газотермические покрытия из порошковых материалов : Справочник / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардатовская; [отв. ред. В. И. Трефилов]; АН УССР, Институт проблем материаловедения. - Киев: Наук. думка, 1987. - 543,[1].

65. Лащенко, Г.И. Плазменное упрочнение и напыление. / Г.И. Лащенко. – К: Экотехнология, 2003. – 64 с. - ISBN: 966-95918-8-0.

66. Кудинов, В.В. Плазменные покрытия. / В.В. Кудинов. – М: Наука, 1977. – 184 с.
67. Краснов, А.Н. Низкотемпературная плазма в металлургии. / А.Н. Краснов, С.Ю. Шаривкер, В.Г. Зильберберг. – М: Металлургия, 1970. – 216 с.
68. Балановский, А.Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. – 180 с. - ISBN: 5-8038-0371-5.
69. Ярошевич, В.К. Электроконтактное упрочнение. / В.К. Ярошевич, Я.С. Генкин, В.А. Верещагин. – М: Наука и техника, 1982. – 256 с.
70. Локтев, Д. Методы и оборудование для нанесения износостойких покрытий / Д. Локтев, Е. Ямашкин // Наноиндустрия. – 2007. – № 4. – С. 18-25. – EDN NXPRGRF.
71. Батищев, А. Н. Упрочнение деталей машин покрытиями, синтезированными из газовой среды / А. Н. Батищев, А. В. Ферябков, Г. В. Шевченко // Вестник Орловского государственного аграрного университета. – 2009. – № 1(16). – С. 21-24. – EDN KVPCJR.
72. Козырев, В.В. Металлоорганические соединения в машиностроении и ремонтном производстве: монография / В.В.Козырев. – Тверь: Изд-во Студия С, 2003. – 160 с.
73. Сыркин, В.Г. CVD-метод. Химическое парофазное осаждение. / В.Г. Сыркин. – М: Наука, 2000. – 496 с. - ISBN: 5-02-001683-7.
74. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами / А.Г. Бойцов, В.Н. Машков, В.А. Смоленцев [и др.]. – М: Машиностроение, 1991. – 144 с.
75. Юровский, В.С. Научные основы разработки резиновых уплотнителей валов и пути совершенствования их качества: дисс. в виде научного доклада ... докт. техн. наук: 05.17.12 / В.С. Юровский. – М.: МИТХТ, 1994. – 48 с.
76. Юровский, В.О. Научные основы и опыт конструирования манжетных уплотнителей для валов / В.О. Юровский, В.К. Коморницкий-Кузнецов, Е.М. Фиалка // Каучук и резина. – 1980. – № 4. – С. 17-20.

77. Лапаев, А. В. Методика расчета толщины ремонтной тонкостенной втулки для восстановления оптимального натяга в соединении «вал - манжета» / А. В. Лапаев, О. М. Мельников // Техника и оборудование для села. – 2025. – № 1(331). – С. 31-34. – DOI 10.33267/2072-9642-2025-1-31-34. – EDN LUBFOR.

78. Безразборный сервис / В. И. Балабанов, А. Г. Гамидов, С. А. Ищенко, В. Беклемышев // Сельский механизатор. – 2006. – № 12. – С. 9-11. – EDN TPBVJJ.

79. Федоров, С. К. Повышение износостойкости деталей из стали 20ХН3А электрохимической поверхностной закалкой / С. К. Федоров, М. В. Власов, А. Г. Гамидов // Международный технико-экономический журнал. – 2019. – № 4. – С. 45-51. – DOI 10.34286/1995-4646-2019-67-4-45-51. – EDN NIORJL.

80. Повышение износостойкости деталей электрохимической поверхностной закалкой / С. К. Федоров, Ю. С. Иванова, М. В. Власов, М. А. Лашуков // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". – 2019. – № 2(90). – С. 40-44. – EDN ZDPQVV.

81. Онуфриенко, И.П. Некоторые технологические возможности повышения износостойкости контактной поверхности вала в уплотнительных узлах авиационных гидроагрегатов. / И.П. Онуфриенко, В.П.Жура // Технология авиационного приборо- и агрегатостроения. – 1972 – Вып.2. – С. 19–24.

82. Кондаков, А.А. Уплотнения гидравлических систем/ А.А. Кондаков. – М.: Машиностроение, 1972 – 215 с.

83. Проволоцкий, А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин. / А.Е. Проволоцкий. – К.: Техника, 1989 – 277 с.

84. Проволоцкий, А.Е. Технологические методы повышения долговечности деталей гидромашин / А.Е. Проволоцкий, С.П. Лапшин, С.Л. Негруб // Промышленная гидравлика и пневматика. - Винница: Винницкий государственный аграрный университет. - 2004-Вып.2(4). - С. 68-71.

85. Голубев, А.В. Уплотнения вращающихся валов/ А.В. Голубев, Г.И. Кукин. – М.: Наука, 1966 – 256 с.

86. Овсеенко, А.Н. Технологическое обеспечение качества изделий машиностроения: монография / А.Н. Овсеенко, В.И. Серебряков, М.М. Гаек. - М.: Янус-К, 2003. - 296 с.- ISBN: 5-8037-0177-7.

87. Чеботарев, М. И. Выбор оптимального способа восстановления изношенной поверхности детали: учеб. пособие / М. И. Чеботарев, М. Р. Кадыров. – Краснодар: КубГАУ, 2016 – 91 с. - ISBN: 978-5-00097-184-0.

88. Тененбаум, М.М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании. / М.М.Тененбаум. - М.: Машиностроение, 1966, 332 с.

89. Методика определения абразивной износостойкости упрочняющих покрытий / А. Н. Батищев, А. В. Ферябков, Ю. В. Мазаев, Ю. А. Кузнецов // Труды ГОСНИТИ. – 2009. – Т. 103. – С. 153-154. – EDN KYCAUN.

90. Терентьев, В.В. Справочные и нормативные материалы для обучающихся по направлению подготовки 35.04.06 «Агроинженерия» (магистратура). – Иваново, 2018. - 122 стр.

91. Мельников, О. М. Повышение работоспособности уплотнительных устройств подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники: специальность 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мельников Олег Михайлович. – Москва, 2020. – 161 с. – EDN RZKQMM.

92. Хрущов, М.М. Абразивное изнашивание / М.М. Хрущов, М.А. Бабичев; Академия наук СССР. Государственный научно-исследовательский институт машиноведения. Москва: Наука, 1970. 252 с.

93. Влияние браслетной пружины на контактную нагрузку в соединении «Вал-манжета» / А.В. Лапаев, О. М. Мельников, Н. В. Серов [и др.] // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 76-80. – DOI 10.26897/2687-1149-2023-4-76-80. – EDN KERICW.

94. Грилихес, С.Я. Электролитические и химические покрытия: теория и практика / С. Я. Грилихес, К. И. Тихонов. – Ленинград: Химия, Ленинградское отделение, 1990. – 288 с.: ил. - ISBN 5-7245-0533-9: 1.40.

95. Гальванотехника: Справочник /Ф. Ф. Ажогин [и др.]; Под ред. А. М. Гинберга и др. - Москва: Металлургия, 1987. - 735 с
96. Гальванические покрытия в машиностроении: Справочник: В 2-х т. Т. I, 2 /Под ред. М.А. Шлугера, Л.Д. Тока. - М.: Машиностроение, 1985.- 248 с.
97. Ямпольский, А.М. Краткий справочник гальванотехника / А. М. Ямпольский, В. А. Ильин. - 3-е изд., перераб. и доп. - Ленинград: Машиностроение: Ленингр. отд-ние, 1981. - 269 с.
98. Грилихес, С.Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов / С. Я. Грилихес; Под ред. П. М. Вячеславова. - 4-е изд., перераб. и доп. - Л.: Машиностроение, 1977. - 113с.
99. Гайдар, С.М. Планирование и анализ эксперимента: учебник / С.М. Гайдар. – М.: Изд-во ФГБНУ «Росинформагротех», 2015. – 548 с.- ISBN: 978-5-7367-1112-3.
100. Левшин, А.Г. Планирование и организация эксперимента: учебное пособие / А.Г. Левшин, А.А. Левшин, А.Е. Бутузов, и др. – М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2015. – 65 с. - ISBN: 978-5-9675-1413-5.
101. Митков, А.Л. Статистические методы в сельхозмашиностроении / А.Л. Митков, С.В. Кардашевский. – М.: Машиностроение, 1978. – 360 с.
102. Управление машиностроительным предприятием: учебное пособие для студентов, обучающихся по программе бакалавриата по направлению подготовки 150700 - Машиностроение / С. Г. Баранчикова, Т. Е. Дашкова, И. В. Ершова [и др.]; Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2015. – 252 с. – ISBN 978-5-7996-1494-2. – EDN UWONFF.
103. Износостойкость покрытий сформированных микродуговым оксидированием / А. Н. Батищев, А. В. Ферябков, А. Л. Севастьянов, Ю. А.

Кузнецов // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. – 2003. – № 1(2). – С. 121-125. – EDN VHDUNF.

104. Казанцев С.П. Разработка комбинированной технологии получения железоборидных покрытий при восстановлении и упрочнении деталей сельскохозяйственной техники: Дис. ... д-ра техн. наук. М.: Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина, 2006. 301 с. EDN: NOANMR.

105. Леонов О.А. Обеспечение качества ремонта унифицированных соединений сельскохозяйственной техники методами расчета точностных параметров: дисс. ... докт. техн. наук: 05.20.03 / Леонов Олег Альбертович. – М., 2004. – 324 с.

106. Карапетян, М. А. Технология восстановления деталей технологических машин / М. А. Карапетян, А. Г. Гамидов, С. К. Тойгамбаев. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Мегаполис", 2021. – 136 с. – ISBN 978-5-6047495-3-1. – EDN STCZPY.

107. Лапаев, А. В. Исследование антифрикционных свойств тонкостенных ремонтных втулок / А. В. Лапаев, О. М. Мельников, Д. А. Лапаев // Техника и оборудование для села. – 2025. – № 5(335). – С. 24-26. – DOI 10.33267/2072-9642-2025-5-24-26. – EDN UUJDGH.

108. ГОСТ 8752–79. Манжеты резиновые армированные для валов. Технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1997. – 48 с.

109. ГОСТ 2789–73 Шероховатость поверхности параметры и характеристики. - Введ.01.01.1975.– М.: Стандартиформ, 2006. – 20 с.

110. ГОСТ 23.224–86 Обеспечение износостойкости изделий. Методы оценки износостойкости восстановленных деталей. - Введ. 1.01.1981.– М.: Издательство стандартов, 1987 – 20 с.

111. ГОСТ 23.002—78. Обеспечение износостойкости. Изделий трение, изнашивание и смазка. Термины и определения. - Введ. 1.07.1979.– М.: Издательство стандартов, 1980 – 14 с.

112. ГОСТ 2999—75 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу - Введ. 1.07.1976.– М.: Издательство стандартов, 1987 – 33 с.

113. ГОСТ 19300–86. Средства измерений шероховатости поверхности профильным методом. Профилографы-профилометры контактные. - Введ. 26.06.1986. – М.: Издательство стандартов, 1986 – 7 с.

114. ГОСТ 23.208–79 Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы - Введ.01.03.1981.– М.: Издательство стандартов, 1981 – 4 с.

115. РД 50.424–83 Методические указания. Надежность в технике. Ускоренные испытания. Основные положения. - Введ. 10.10.1983.– М.: Издательство стандартов, 1984 – 12 с.

116. ГОСТ 23.211-80 «Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний материалов на изнашивание при фреттинге и фреттинг-коррозии» - Введ. 1.01.1982.– М.: Издательство стандартов, 1982 – 5 с.

117. ГОСТ 24642-81 Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Основные термины и определения. - Введ. 1.07.1981.– М.: Издательство стандартов, 1984 – 15 с.

118. ГОСТ 24643 - 81 Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Числовые значения. - Введ. 1.07.1981.– М.: Издательство стандартов, 1984 – 10 с.

119. ГОСТ 2768-84 Ацетон технический. Технические условия. - Введ. 1.07.1985.– М.: Издательство стандартов, 1985 – 15 с.

120. ГОСТ 2138 - 91 Пески формовочные. Общие технические условия. - Введ.01.01.1993.– М.: Стандартиформ, 2005. – 7 с.

121. ГОСТ 3647 - 80 Материалы шлифовальные. Классификация. Зернистость и зерновой состав. Методы контроля. - Введ. 1.01.1982.– М.: Издательство стандартов, 1997 – 21 с.

122. Capacitive biosensors Berggren C., Vjarnason B., Johansson G. *Electroanalysis*. 2001. Т. 13. № 3. С. 173-180.

123. Wu X., Jiang Y., Wu T., Zuo B., Bian S., Lu K., Zhao L., Yu L., Xu J. Insight into the Mechanisms of Nitride Films with Excellent Hardness and Lubricating Performance: A Review // *Nanomaterials*. - 2023. - Vol. 13. - P. 2205.

124. Tibor C. Application of Coatings for Tooling Quo Vadis 2005? // *Vakuum in Forschung und Praxis*. - 2005. - Vol. 17. - P. 33-39.

125. Ju H.B., Pci J., Junhua X., Lihua Y., Isaac A., Yaoxiang G. Crystal structure and high temperature tribological behavior of niobium aluminum nitride films // *Materialia*. - 2018. - Vol. 3. - P. 202-211.

126. Ju H.B., Yu L.H., He S., Ascmpah I., Xu J.H., Hou Y. The enhancement of fracture toughness and tribological properties of the titanium nitride films by doping yttrium // *Surf. Coat. Technol.* - 2017. - Vol. 321. - P. 57-63.

127. Xu J.H., Ju H.B., Yu L.H. Microstructure, oxidation resistance, mechanical and tribological properties of Mo-Al-N films by reactive magnetron sputtering // *Vacuum*. - 2014. - Vol. 103. - P. 21-27.

128. Yu L.H., Xu J.H., Dong S.R., Isao K. Surface morphology and growth mechanisms for sputtered amorphous silicon nitride thin films // *Thin Solid Films*. -2008.- Vol. 516.-P. 1781-1787.

129. Ju H.B., Xu J.H. Microstructure, oxidation resistance, mechanical and tribological properties of Ti-Y-N films by reactive magnetron sputtering // *Surf. Coat. Technol.* - 2015. - Vol. 283. - P. 311-317.

130. ООО «Литейный завод» [Электронный ресурс]. URL: <https://litzavod.com/> (дата доступа 21.03.2025).

131. ООО «3D АЛЬЯНС» [Электронный ресурс]. URL: <https://all3d.ru/o-kompanii/> (дата доступа 21.03.2025).

132. АО «ЧИП и ДИП» [Электронный ресурс]. URL: www.chipdip.ru/product/cr-99098-speedi-sleeve-shaft-dia (дата доступа 8.04.2025)

133. ООО ТД «Подшипник Трейд» [Электронный ресурс]. URL: <https://podtrade.ru/product/26256/>(дата доступа 8.04.2025)

134. ООО «ВЕЛЬКИН» [Электронный ресурс]. URL: https://velkin.ru/catalog/uplotneniya/iznosostoykie_remontnye_vtulki_skf_speedi_sleeve/ (дата доступа 8.04.2025)

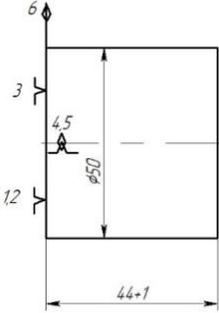
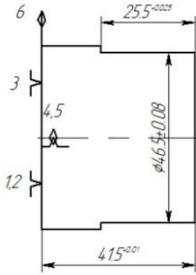
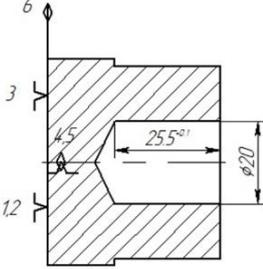
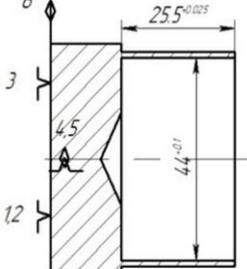
135. ООО "КЗ "Ростсельмаш" [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1744871554&tld=ru&lang=ru&name=HowToSelect-Havester-Rev.pdf&text>. (дата доступа 15.04.2025).

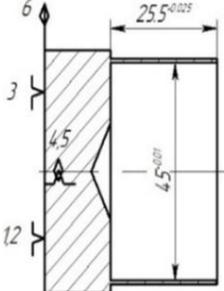
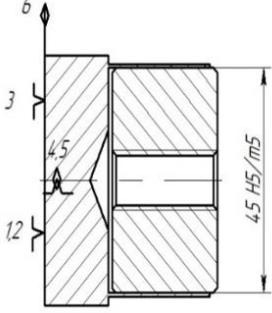
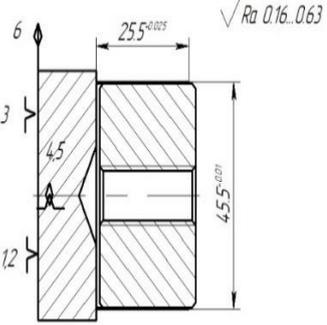
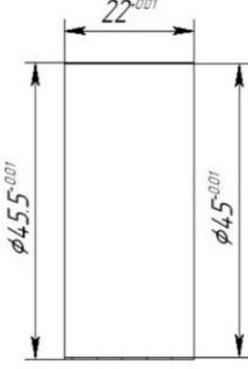
136. ООО «Евразия групп» [Электронный ресурс]. URL: <https://metall-machinery.ru/catalog/tokarnye-stanki-s-chpu/tokarnyy-standok-s-chpu-sk6136kh750/> (дата доступа 20.03.2025).

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А – Технологический процесс изготовления детали

Таблица А.1 – Технологический процесс изготовления детали «тонкостенная ремонтная втулка» (вариант)

№ операции	Наименование операции и переходы	Эскиз обработки	Станок, инструмент, оснастка
000	Заготовительная 1. Отрезать пруток $l = 30$ мм		Ленточнопильный станок REALREZ MBS 712 SW
005	Токарная 1. Проточить в размер $46,5 \pm 0,08$ мм на длину $25,5 + 0,025$ мм Подача на оборот 0,1 мм/об скорость резания 335 м/мин 2. Подрезать торец в размер $l = 41,5 + 0,01$ мм Глубина 2,5 мм Подача на оборот 0,05 мм/об скорость резания 335 м/мин		Токарный станок FАВТЕС СК6136/750 Проходной упорный резец
010	Токарная 1. Сверлить отверстие диаметром 20 мм На глубину $25,5 + 0,1$ мм Скорость резания 50 м/мин Подача инструмента 90 мм/мин		Токарный станок FАВТЕС СК6136/750 Сверло под конус морзе-2 ГОСТ 10903-77 диаметром 20 мм
015	Токарная 1. Расточить диаметр 20 мм до $44 + 0,1$ мм Подача на оборот 0,1 мм/об Скорость резания 335 м/мин		Токарный станок FАВТЕС СК6136/750 Расточной резец

020	<p>Токарная</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Расточить диаметр $44 + 0,1$ мм в диаметр $45 + 0,01$ мм 2 прохода <p>Глубина 0,25 мм Подача на оборот 0,05 мм/об Скорость резания 335 м/мин</p>		<p>Токарный станок FABTEC СК6136/750 Расточной резец</p>
021	<p>Токарная</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Установить поддерживающую оснастку задней бабкой 		<p>Токарный станок FABTEC СК6136/750 Поддерживающая оснастка (1)</p>
025	<p>Токарная</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Проточить внешний диаметр в размер $45,5 + 0,01$ мм 2 прохода <p>Глубина 0,25 мм Подача на оборот 0,05 мм/об Скорость резания 335 м/мин</p>		<p>Токарный станок FABTEC СК6136/750 Проходной упорный резец</p>
030	<p>Токарная</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Извлечь поддерживающую оснастку с помощью резьбовой рукоятки 2. Отрезать деталь в линейный размер $22 + 0,01$ мм 3. Острые кромки притупить 		<p>Токарный станок FABTEC СК6136/750 Отрезной резец</p>

ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Сертификат качества на втулку с покрытием Хтв21

ИП Еремин А.Ю.

603141, Нижний Новгород, ул. Геологов, д. 1, пом. П47, оф. 4
Тел.: 8-910-798-82-68, 8-952-448-91-53,
Факс: 8 (831) 299-32-86
E-mail: info@izbl.ru, post@ximkroff.ru
Сайт: <http://izbl.ru>, <http://ximkroff.ru>
ИНН 522903104554,
Р/сч 40802810000000218086,
к. с. 30101810145250000974
в АО «Тинькофф Банк»

СЕРТИФИКАТ КАЧЕСТВА №35 от 23.10.2024г.

Выдан: Лапаеву Андрею Валентиновичу

Основание выдачи: Акт выполненных работ № 122 от 23 октября 2024 г.

Перечень деталей:

№	Наименование детали	Количество, шт.	Вид гальванического покрытия	Обозначение покрытия	Толщина покрытия
1	Втулка ф 45,5 L10	2	Хромирование твердое	Хтв 21	21-30 мкм
2	Втулка ф 45,5 L30	1	Хромирование твердое	Хтв 21	21-30 мкм

Покрытие выполнено по технологии, соответствующее требованиям ГОСТ 9.305-84.

Качество покрытия и внешний вид соответствуют требованиям ГОСТ 9.301-86. Микротвердость покрытия 1100 – 1250 HV (по прибору ПМТ-3).

Начальник службы ОТК



/Еремин А.Ю./

ПРИЛОЖЕНИЕ В – Паспорт качества на вакуумное покрытие



Общество с ограниченной ответственностью
«ВМ-Технологии»

ИНН 6168120323 КПП 616801001 ОГРН 1236100015403
Адрес регистрации: 344033, РОСТОВСКАЯ ОБЛАСТЬ, Г.О. ГОРОД РОСТОВ-НА-ДОНУ,
Г РОСТОВ-НА-ДОНУ, УЛ ПОРТОВАЯ, Д. 393 , ПОМЕЩ. 20/1
Обособленное подразделение КПП 120045002,
424016, республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, улица Луначарского 52
89177023104 / npppoisk@mail.ru

ПАСПОРТ КАЧЕСТВА НА ВАКУУМНОЕ ПОКРЫТИЕ

1. Изделия:

	Чертеж	Количество
1	Кольцо	1

2. Параметры покрытия:

1	Тип покрытия	TiN (нитрид титана)
2	Толщина	4,2 – 4,9 – 5,2 мкм.
3	Микротвердость	H _{v50} = 1890 – 1950 -2170

3. Дополнительная информация:

Технология нанесения нитрида титана соответствует ТР 1.4.1580-2010 и
ОСТ 1 12926-77.

Подготовительные операции перед нанесением покрытия включают в себя:

1. Очистка изделий в нагретом растворе моющего средства (ТУ2383-006-12910434-
2008) в ультразвуковой ванне.

2. Промывка изделий в дистиллированной воде. Удаление воды и остатков моющего
средство при помощи пароструйного аппарата.

3. Обезжиривание изделий в спирте (ФС.2.1.0036.15)

Методы измерения: прибор ПМТЗМ.

Руководитель обособленного
подразделения действует на
основании доверенности №1 от
03.07.2023г



Степанов С. А.

**ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Результаты испытаний для определения
износостойкости исследуемых соединений**

Таблица Г.1 – Износ в соединении «вал-манжета» (наработка 2 часа).

Исследуемые образцы	Износ образцов, мм.	Среднеарифметическое значение W, мм.
Втулка (Сталь 45) 	нет	нет
Манжеты	0,118; 0,125; 0,116; 0,12; 0,124	0,121
Износ соединения		0,121
ТРВ (AISI 321) 	нет	нет
Манжеты	0,04; 0,042; 0,032; 0,038; 0,028	0,036
Износ соединения		0,036
ТРВ (ХТВ21) 	нет	нет
Манжеты	0,12; 0,114; 0,118; 0,11; 0,112	0,115
Износ соединения		0,115
ТРВ (TiN) 	нет	нет
Манжеты	0,046; 0,052; 0,06; 0,048; 0,059	0,053
Износ соединения		0,053

Таблица Г.2 – Износ деталей соединения «вал-манжета» (Нормальная ступень – наработка 9 часов).

Исследуемые образцы	Износ образцов, мм.	Среднеарифметическое значение W, мм.
Втулка (Сталь 45) 	0,001897; 0,001967; 0,002607; 0,002638; 0,002131	0,00225
Манжеты	0,323; 0,369; 0,345; 0,295; 0,343	0,335
Износ соединения		0,337
ТРВ (AISI 321) 	0,004554; 0,004168; 0,003875; 0,00395; 0,003778	0,004065
Манжеты	0,218; 0,236; 0,292; 0,286; 0,248	0,256
Износ соединения		0,26
ТРВ (ХТВ21) 	0,00352; 0,003574; 0,003543; 0,003502; 0,003547	0,003534
Манжеты	0,387; 0,478; 0,49; 0,51; 0,377	0,45
Износ соединения		0,454
ТРВ (TiN) 	0,000205; 0,000198; 0,00021; 0,000237; 0,000225	0,000215
Манжеты	0,45; 0,374; 0,354; 0,367; 0,38	0,385
Износ соединения		0,385

Таблица Г.3 – Износ деталей соединения «вал-манжета» (Нормальная ступень – наработка 18 часов).

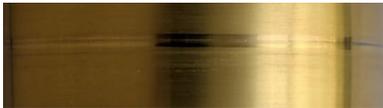
Исследуемые образцы	Износ образцов, мм.	Среднеарифметическое значение W, мм.
Втулка (Сталь 45) 	0,004133; 0,004391; 0,004051; 0,00398; 0,004082	0,00413
Манжеты	0,457; 0,484; 0,52; 0,487; 0,452	0,48
Износ соединения		0,484
ТРВ (AISI 321) 	0,00655; 0,006805; 0,007026; 0,00662; 0,006794	0,006685
Манжеты	0,47; 0,485; 0,359; 0,416; 0,42	0,43 мм
Износ соединения		0,437 мм
ТРВ (ХТВ21) 	0,005652; 0,005832; 0,005575; 0,005501; 0,005499	0,00561
Манжеты	0,734; 0,826; 0,712; 0,695; 0,658	0,725
Износ соединения		0,731
ТРВ (TiN) 	0,000382; 0,000416; 0,000375; 0,00039; 0,000412	0,000395
Манжеты	0,515; 0,472; 0,48; 0,453; 0,46	0,476
Износ соединения		0,476

Таблица Г.4 – Износ деталей соединения «вал-манжета» (Нормальная ступень – наработка 32 часа).

Исследуемый образец	Износ образцов, мкм.	Среднеарифметическое значение W, мм.
Втулка (Сталь 45) 	0,005934; 0,006078; 0,00543; 0,005728; 0,005655	0,00577
Манжеты	0,55; 0,665; 0,635; 0,582; 0,593	0,605
Износ соединения		0,611
ТРВ (AISI 321) 	0,00794; 0,007638; 0,007732; 0,008021; 0,007594	0,00779
Манжеты	0,562; 0,61; 0,526; 0,508; 0,534	0,548
Износ соединения		0,556
ТРВ (ХТВ21) 	0,00675; 0,006348; 0,006578; 0,00643; 0,006169	0,00646
Манжеты	0,895; 0,96; 0,986; 0,889; 0,995	0,945
Износ соединения		0,951 мм
ТРВ (TiN) 	0,00058; 0,000612; 0,000573; 0,000594; 0,000556	0,000583
Манжеты	0,52; 0,492; 0,486; 0,511; 0,501	0,502
Износ соединения		0,503

ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Акт эксплуатационных испытаний упрочненных тонкостенных втулок от 15.07.2025г.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева,
доктор биологических наук, профессор
Селионова Марина Ивановна



2025 г.

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер СПК «КОЛОС»
п/о Селезневка с. Большое Подовечье,
Милославского района
Рязанской области
Кошолкин Виктор Михайлович



2025 г.

АКТ

эксплуатационных испытаний
упрочненных тонкостенных ремонтных втулок

Мы, нижеподписавшиеся, главный инженер СПК «КОЛОС» В.М. Кошолкин и механик СПК «КОЛОС» В.Ю. Крысанов, с одной стороны, и соискатель ученой степени кандидата наук от кафедры сопротивления материалов и деталей машин ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева А.В. Лапаев, с другой стороны, составили настоящий акт о том, что 1 февраля 2025 года была проведена установка тонкостенных ремонтных втулок (объект испытаний) на технику СПК «КОЛОС», на которой были выявлены утечки масла в соединении «вал–манжета» переднего ведущего моста:

Марка трактора	Заводской номер	Вид тонкостенных ремонтных втулок
БЕЛАРУС – 82.1	808232538	Сталь AISI 321 с упрочнением TiN
БЕЛАРУС – 82.1	80842662	Сталь AISI 321 с упрочнением TiN
БЕЛАРУС – 82.1	808191297	Сталь AISI 321 с упрочнением TiN

После установки тонкостенных ремонтных втулок герметичность соединения «вал–манжета» восстановлена.

На 15 июля 2025 года наработка техники:

БЕЛАРУС – 82.1, зав.№ 808232538 – 716 моточасов;

БЕЛАРУС – 82.1, зав.№ 80842662 – 722 моточаса;

БЕЛАРУС – 82.1, зав.№ 80842662 – 696 моточасов.

Состояние объектов испытаний:

1. Утечек смазочного материала не выявлено, все соединения находятся в работоспособном состоянии и пригодны к дальнейшей эксплуатации:

2. При осмотре соединения «вал–манжета» дефектов рабочих поверхностей тонкостенных ремонтных втулок упрочнённых TiN не выявлено.

В настоящее время испытания продолжаются.

Механик СПК «КОЛОС»

В.Ю. Крысанов

Соискатель ученой степени
кандидата наук

А.В. Лапаев

Главный инженер СПК «КОЛОС»

В.М. Кошолкин