

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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2025

Работа выполнена на кафедре сопротивления материалов и деталей машин Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

Научный руководитель      **Мельников Олег Михайлович**,  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
сопротивления материалов и деталей машин  
ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный  
университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»

Официальные оппоненты: **Федоров Сергей Константинович**  
доктор технических наук, доцент, профессор  
кафедры «Технологии обработки материалов»  
ФГАОУ ВО «Московский государственный  
технический университет имени Н. Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)

**Ферябков Александр Витальевич**  
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры  
«Технологического развития систем  
жизнеобеспечения сельских территорий» ФГБОУ  
ВО Министерства сельского хозяйства Российской  
Федерации «Российский государственный  
университет народного хозяйства имени  
В. И. Вернадского»

Ведущая организация      ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный  
центр ВИМ»

Защита состоится 27 ноября 2025 г. в 12:30 на заседании диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», по адресу: 127550, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел/факс: 8 (499) 976-17-14.

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

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

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Н. Н. Пуляев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Эффективное использование сельскохозяйственной техники зависит от конструктивно-технологических решений, заложенных при ее производстве, условий эксплуатации, а также от технического обслуживания и ремонта. В современных условиях основной упор в развитии отечественного машиностроения сделан на инновационные и технологические прорывы, где одной из задач является импортозамещение.

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 разы превышают ее первоначальную стоимость. В конструкцию практически всей сельскохозяйственной техники входят уплотнительные устройства. Нарушение герметичности соединений «вал–уплотнение» снижает надежность эксплуатации машин, ухудшает экологию, повышает расход смазочных материалов, ведет к разрушению узлов, повышая потребность в запасных частях. Около 90% аварийных ситуаций в подшипниковых узлах вызвано неудовлетворительной работой уплотнений. Повышение надежности уплотнительных узлов должно закладываться при проектировании техники с учетом особенностей ее эксплуатации, а восстановление работоспособности уплотнительных узлов должно обеспечиваться в результате недорогого качественного ремонта машин.

**Степень разработанности темы.** Вопросам повышения надежности техники, совершенствованию технического обслуживания и ремонта в сельскохозяйственном производстве посвящены работы А.С. Апатенко, В.И. Балабанова, Д.В. Варнакова, С.М. Гайдара, И.Г. Голубева, О.Н. Дидманидзе, А.С. Дорохова, М.Н. Ерохина, А.И. Иванова, С.П. Казанцева, 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. Хрущева, В.С. Юровского и др.

При капитальном ремонте энергонасыщенных тракторов замене подлежат все уплотнения, около 70% валов ключевых узлов, определяющих ресурс техники, требуют восстановления рабочих поверхностей в зоне контакта с уплотнениями. Анализ партий валов, требующих ремонта, показал, что 73% из них требуют

восстановления поверхности в местах контакта с уплотнениями, и лишь 27% входят в поле допуска изготовления. И если замена манжеты не является трудоемкой операцией, то ремонт вала это трудоемкий и дорогостоящий процесс. Методы восстановления наружной цилиндрической поверхности вала, за исключением использования дополнительной ремонтной детали, требуют замены узла при агрегатном методе ремонта, или ремонта агрегата с его разборкой, восстановлением или заменой изношенного вала.

Для увеличения эффективности использования сельскохозяйственной техники необходимо разработать быстрый и экономически выгодный способ восстановления рабочих свойств наружной цилиндрической поверхности вала.

**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 эффективного способа 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, стендовые и эксплуатационные 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.

**Личный вклад автора состоит** в анализе научно-технической литературы; исследованиях механизмов абразивного изнашивания в зоне контакта вала и манжеты; анализе способов упрочнения поверхностного слоя и в выборе оптимальных способов для упрочнения тонкостенных ремонтных втулок; изготовлении образцов тонкостенных ремонтных втулок с заданными параметрами шероховатости и микротвердости рабочей поверхности; проведении испытаний рабочей поверхности втулок на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы, испытаний для определения сил трения и температуры в зоне контакта втулки с манжетой, испытаний по определению износостойкости исследуемых соединений, эксплуатационных испытаний тонкостенных ремонтных втулок; обработке и анализе полученного объема экспериментальных данных; подготовке статей и выступлениях с докладами на конференциях.

**Структура и объём 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.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость результатов исследований, приведены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе «Состояние вопроса. Цель и задачи исследования»** проведен анализ состояния парка сельскохозяйственной техники, анализ условий эксплуатации сельскохозяйственной техники и их влияния на работоспособность соединений «вал–уплотнение»; рассмотрены уплотнения, применяемые в сельскохозяйственной технике, дефекты в соединениях «вал–манжета», требования к поверхности вала в зоне контакта с уплотнением; проанализированы методы восстановления рабочих поверхностей валов в зоне контакта с манжетой; проведен анализ работ по упрочнению.

Практически все детали сельскохозяйственной техники работают в непосредственном контакте с почвой, оказывающей разрушающее действие на поверхности трения. Здесь и повышенная влажность, кислотность, абразивное воздействие и другие факторы, ускоряющие износ деталей и особенно трибосоединений. Большое количество деталей сельскохозяйственной техники по характеру выполняемой функции взаимодействуют с частицами, вызывающими абразивный износ. Абразивное разрушение поверхностных слоев пар трения даже при небольшом количестве абразивных частиц опережает другие виды поверхностного разрушения. Так, накопление пыли в смазочном материале до 0,25% по массе приводит к отказу подшипников качения в 10 раз быстрее по сравнению с нормативами.

Для герметизации подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники в основном (до 80 %) применяют резиновые армированные манжеты, изготавливаемые по ГОСТ 8752–79. Около 95% сопряженных с манжетами деталей изготавливают из среднеуглеродистых и легированных сталей: 45, 40Х, 18ХГТ, 38ХГС.

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

Наиболее распространёнными дефектами соединения «вал–манжета» являются:

- повреждение кромки манжеты из-за увеличения нагрузки при страгивании;
- 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 машин, повышает расход смазочных материалов, ведет к

разрушению узлов, увеличивая потребность в запасных частях. Нарушение в работе уплотнений тракторов наблюдается в коробках передач – 44%, а в гидросистемах – 31%. Утечки масла через уплотнения в энергонасыщенных тракторах составляют 23–28%, а в гидроагрегатах до 44% от общего числа отказов.

Увеличение долговечности соединения «вал–манжета» достигается за счет улучшения антифрикционных и износостойких характеристик контактирующих поверхностей. Одним из основных способов снижения износа валов служит повышение твердости поверхности трения. Увеличение твердости стальных деталей в зоне трения до значений, сравнимых с микротвердостью кварца (10500 – 11300 МПа) и оксида алюминия (21000 МПа), способно значительно продлить срок службы механизмов.

Анализ методов восстановления наружной цилиндрической поверхности вала показывает, что основные методы восстановления, такие как: точение под ремонтный размер, различные виды напыления, электроконтактная приварка ленты, использование полимерных материалов, – требуют замены узла при агрегатном методе ремонта, или ремонта агрегата с его разборкой, восстановлением или заменой изношенного вала, что ведет к длительному простое сельскохозяйственной техники. Восстановление рабочих свойств наружной цилиндрической поверхности вала с использованием дополнительной ремонтной детали (тонкостенной ремонтной втулки) является самым быстрым, эффективным и экономически выгодным способом.

Преимущества ремонтных тонкостенных втулок:

- восстановление функционального натяга в соединении «вал–манжета» при износе манжеты и (или) поверхности вала;
- продление жизненного цикла уплотнительного узла;
- совместимость втулки с оригинальным уплотнением;
- отсутствие необходимости шлифования, металлизации или других видов обработки вала;
- снижение трудозатрат на ремонт техники;
- возможность устранения неисправности в полевых условиях.

Для упрочнения рабочей поверхности тонкостенной втулки были выбраны два способа:

- электролитическое покрытие на основе хрома (температура нанесения в интервале 45–55 °С, обеспечивающее микротвердость 11000 – 16000 МПа);
- физическое осаждение из паровой фазы (PVD) (температура нанесения в интервале 200 – 450 °С, обеспечивающее микротвердость более 21000 МПа).

В соответствии с целью работы сформулированы задачи исследования.

**Вторая глава «Теоретическое обоснование основных параметров тонкостенной ремонтной втулки»** посвящена обоснованию основных параметров тонкостенных ремонтных втулок с целью обеспечения оптимальных условий работы уплотнительного узла.

Основным уплотняющим элементом в зоне трения с валом является эластичный элемент манжеты. Увеличение внутреннего диаметра манжеты  $\Delta D$  (рисунок 1), при установке ее на уплотняемую поверхность, равняется разности между диаметром уплотняемой поверхности и диаметром уплотняющей кромки манжеты в свободном положении:

$$\Delta D = D - D_0 \quad (1)$$

При установке ремонтной втулки (рисунок 2) увеличение внутреннего диаметра манжеты  $\Delta D$ , при установке ее на уплотняемую поверхность, будет равняться разности между рабочей поверхностью втулки и диаметром уплотняющей кромки манжеты в свободном положении:

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

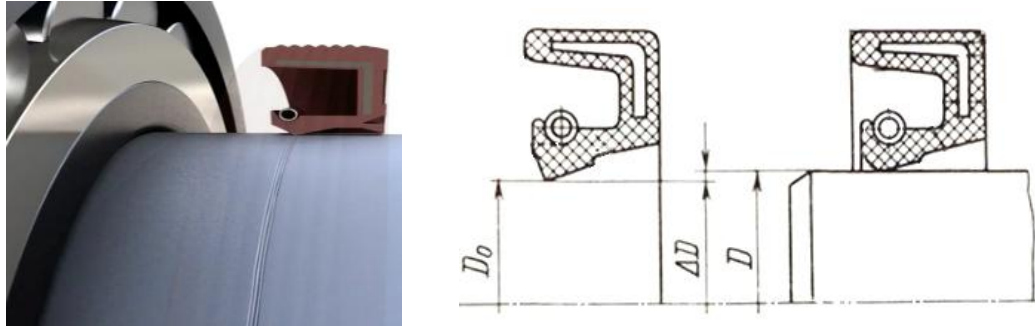


Рисунок 1 – Соединение «вал–манжета»

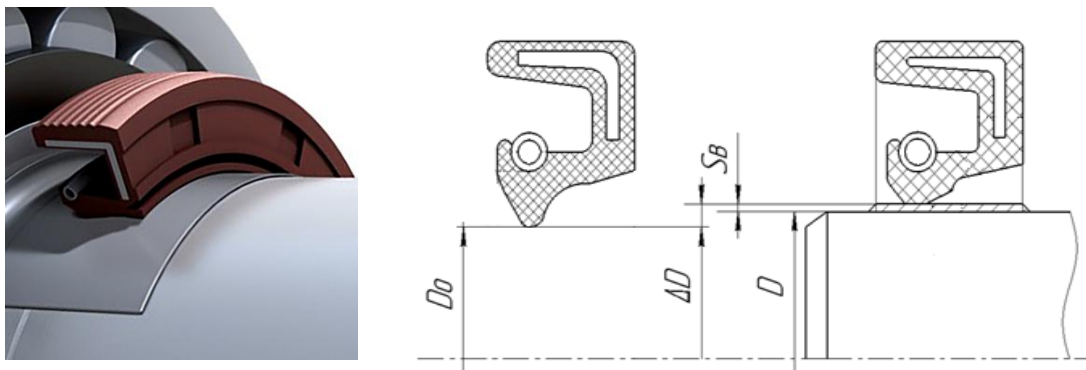


Рисунок 2 – Соединение «вал–манжета» с ТРВ

Тогда толщину ремонтной тонкостенной втулки определим по формуле

$$S_B = \frac{\Delta D - (D - D_0)}{2}. \quad (3)$$

Определяющим параметром, учитывающим большинство конструктивных и эксплуатационных факторов, влияющих на утечки уплотняющей среды, является удельная контактная нагрузка манжеты на вал  $\bar{F}$ . Изменение внутреннего диаметра манжеты  $\Delta D$  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.

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

$$\bar{F} = \bar{F}_M + \bar{F}_И + \bar{F}_П + \bar{F}_Р, \quad (4)$$

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;

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

Удельное контактное усилие от разности давления внешней среды  $p_c$  и внутреннего давления  $p$  на профиль эластичного элемента манжеты

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

Удельное контактное усилие от растяжения эластичного элемента манжеты

$$\bar{F}_m = \frac{2ES\Delta D}{(D_0 + s)D}. \quad (6)$$

Удельное контактное усилие от изгиба эластичного элемента

$$\bar{F}_n = \frac{\Delta D E s_1^3}{8l^3}. \quad (7)$$

Удельное  $F_{\Pi}$  контактное усилие на рабочую кромку от браслетной пружины

$$\bar{F}_{\Pi} = \frac{2F_{\Pi}(l - \Delta l)}{lD}, \quad (8)$$

где

$$F_{\Pi} = F_0 + \Delta F; \quad (9)$$

$$F_0 = \frac{\pi\tau_0 d_{\Pi}^3}{8kd_c}; \quad (10)$$

$$\Delta F = \frac{\Delta L G d_{\Pi}^5}{8L_0 d_c^3}, \quad (11)$$

где

$$\Delta L = \pi\Delta D. \quad (12)$$

Подставляя в равенство (8) выражения (9), (10), (11), (12), получаем:

$$\bar{F}_{\Pi} = \frac{2\left(\frac{\pi\tau_0 d_{\Pi}^3}{8kd_c} + \frac{\pi\Delta D G d_{\Pi}^5}{8L_0 d_c^3}\right)(l - \Delta l)}{lD}. \quad (13)$$

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

$$\bar{F} = \bar{F}_p + \frac{2ES\Delta D}{(D_0 + s)D} + \frac{\Delta D E s_1^3}{8l^3} + \frac{2\left(\frac{\pi\tau_0 d_{\Pi}^3}{8kd_c} + \frac{\pi\Delta D G d_{\Pi}^5}{8L_0 d_c^3}\right)(l - \Delta l)}{lD}. \quad (14)$$

Выразим значение  $\Delta D$  из выражения (13):

$$\Delta D = \frac{\bar{F} - \bar{F}_p - \frac{\pi\tau_0 d_{\Pi}^3(l - \Delta l)}{4kd_c lD}}{\frac{2ES}{(D_0 + s)D} + \frac{E s_1^3}{8l^3} + \frac{\pi G d_{\Pi}^5(l - \Delta l)}{4L_0 d_c^3 lD}}. \quad (15)$$

Подставив выражение 15 в формулу 3, получим толщину втулки:

$$S_B = \frac{\bar{F} - \bar{F}_p - \frac{\pi\tau_0 d_{\Pi}^3(l - \Delta l)}{4kd_c lD}}{\frac{4ES}{(D_0 + s)D} + \frac{E s_1^3}{4l^3} + \frac{\pi G d_{\Pi}^5(l - \Delta l)}{2L_0 d_c^3 lD}} - \frac{(D - D_0)}{2}. \quad (16)$$

Для обоснования оптимального уровня твердости поверхности тонкостенной ремонтной втулки необходимо понять, как происходит износ в соединении «вал–

манжета». Процесс изнашивания можно представить в виде схемы, показанной на рисунке 3.

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.

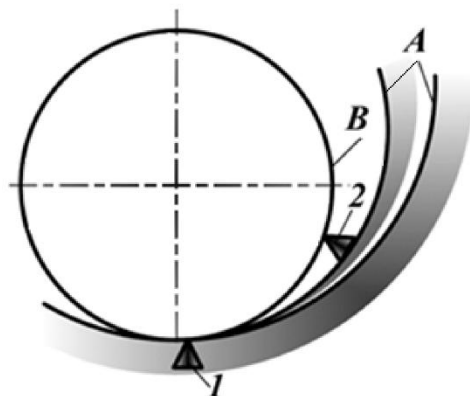


Рисунок 3 – Схема абразивного изнашивания:

А – мягкие поверхности; В – твердая поверхность; 1 и 2 – абразивные частицы

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

Для оценки «степени агрессивности» абразивных частиц по отношению к изнашиваемым поверхностям используют 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:

$$K_T = \frac{H}{H_a}. \quad (17)$$

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

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

$$H > 0,7H_a. \quad (18)$$

Чем выше твердость материала по сравнению с твердостью абразивной частицы, тем ниже уровень контактных напряжений, создаваемых этой частицей в поверхностном слое. При росте соотношения  $H/H_a$  снижается предельная нагрузка, которую способна воспринимать абразивная частица. Если нагрузка превышает допустимый предел, контактный выступ частицы разрушается, что вызывает деконцентрацию контактных напряжений, т.е. снижение их уровня из-за увеличения площади соприкосновения частицы с поверхностью детали.

В целях уменьшения износа, увеличения долговечности пар трения, при проектировании контактных уплотнений следует стремиться к созданию условий жидкостного или полужидкостного трения, при котором между трущимися поверхностями существует слой смазки. Наличие масляной пленки способствует уменьшению силы трения

и температуры в зоне контакта, а также сглаживанию возникающих при работе манжетных уплотнений отрицательных динамических эффектов.

Толщина разделительной пленки, образующейся в зоне контакта, определяется комплексом факторов: вязкостью смазочного материала, контактным давлением, температурой, скоростью вращения вала, шероховатостью его рабочей поверхности и наличием винтовых рисок, образующихся при механической обработке. Как видно из формулы 19, толщина масляной пленки  $h$  зависит от  $Rv_1$  – максимальной глубины впадины микрорельефа вала, мкм;  $Rv_2$  – максимальной глубины впадины микрорельефа манжеты, мкм;  $\mu$  – вязкости жидкости;  $d$  – диаметра сопрягаемых поверхностей, мм;  $v$  – скорости относительного движения вала и манжеты;  $E$  – модуля упругости резины, из которой сделана манжета:

$$h = 0,81 \sqrt{\frac{d \cdot \mu \cdot v}{E} + (Rv_1 + Rv_2)}. \quad (19)$$

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

Первоначальный износ сопрягаемых деталей зависит от формы и высоты микронеровностей. Зависимость интенсивности износа от высоты неровностей иллюстрируется рисунком 4.

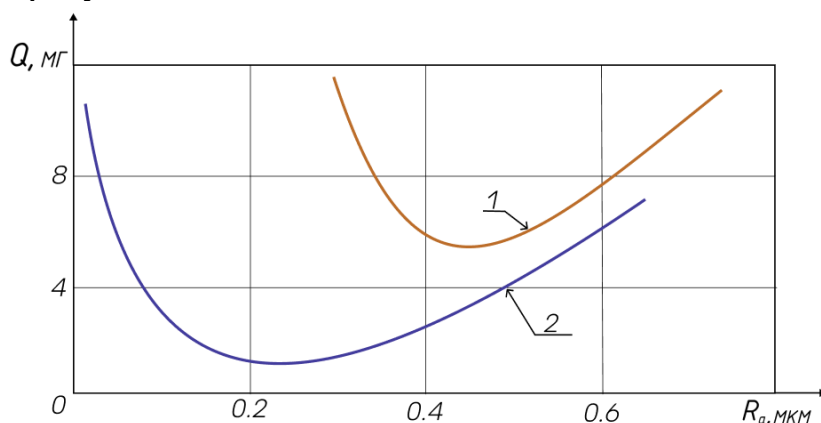


Рисунок 4 – Влияние высоты микронеровностей  $Ra$  на величину износа:  
1 – для трудных; 2 – для менее трудных условий трения

В соединении «вал–манжета» при равных высотных параметрах микрорельеф может иметь различную форму (рисунок 5), что влияет на эксплуатационные свойства детали. Поверхности с маложестким или среднежестким микропрофилем будут изнашиваться интенсивнее, чем поверхности с жестким микропрофилем.

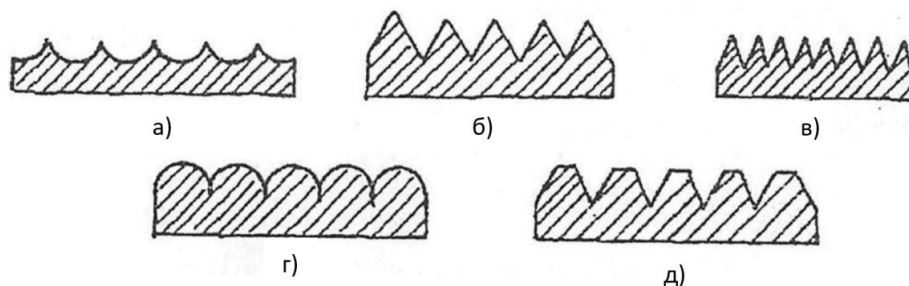


Рисунок 5 – Микропрофиль поверхности:  
а – маложесткий; б, в – среднежесткий; г, д – жесткий

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

В третьей главе «Методика проведения экспериментальных исследований» представлена последовательность проведения экспериментальных исследований по определению влияния использования тонкостенной ремонтной втулки с заданными параметрами на работоспособность соединения «вал–манжета».

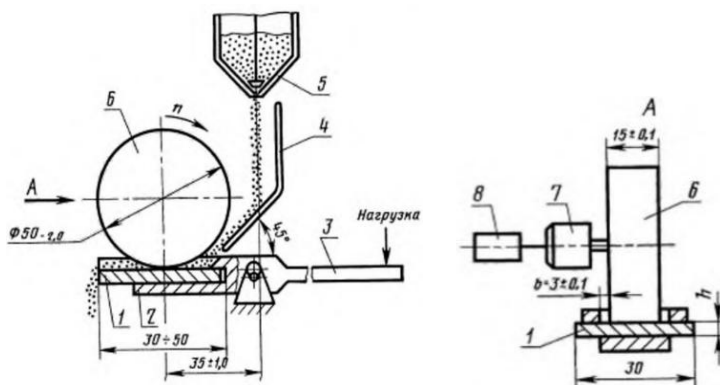
Согласно целям, поставленным в работе, разработан план проведения экспериментальных исследований, который включает следующие пункты:

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 использована методика определения износа рабочей поверхности втулок профилографированием. Для проведения стендовых испытаний соединения «вал–манжета» подобрано и изготовлено оборудование (рисунки 6–8).



а)

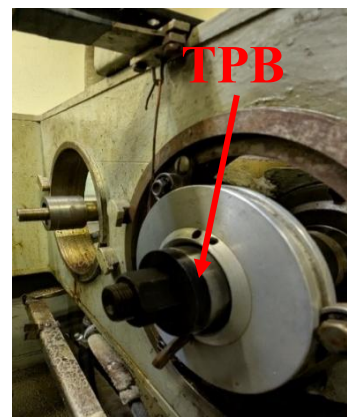


б)

Рисунок 6 – Установка для испытаний на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы: а) общий вид; б) схема установки



а)



б)

Рисунок 7 – Установка для стендовых испытаний: а) общий вид; б) устройство для измерения усилия трения

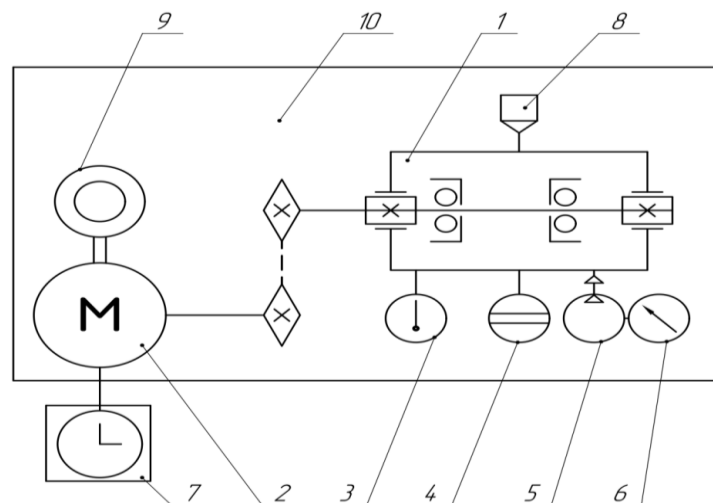


Рисунок 8 – Схема испытательного стенда: 1– рабочая камера; 2 – электропривод; 3 – термометр; 4 – указатель уровня масла; 5 – компрессор; 6 – манометр; 7 – прибор для управления временем; 8 – заливная горловина; 9 – тахометр; 10 – основание

Испытания проведены в соответствии с ГОСТ 23.224–86 «Методы оценки износостойкости восстановленных деталей», ГОСТ 23.208–79 «Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы».

Эксплуатационные испытания тонкостенных ремонтных втулок проводятся в одном из сельскохозяйственных предприятий с целью проверки работоспособности ТРВ в реальных условиях эксплуатации.

Контроль износа тонкостенных ремонтных втулок осуществлялся профилографом 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.

**Четвертая глава «Результаты исследований и их анализ»** посвящена результатам исследований.

Приведены расчеты параметров ремонтной втулки для соединения «вал – манжета» с номинальным диаметром  $D = 45$  мм.

Установлено, что для обеспечения герметичности необходимо удельное усилие  $\bar{F} > 0,2$  Н/мм, при котором на рабочей кромке манжет сохраняется тонкая масляная пленка, обеспечивающая полужидкостную смазку, а утечки составляют не более 3–5 капель в час. При  $\bar{F} > 0,4$  Н/мм происходит выдавливание плёнки смазочного материала из зоны контакта, что приводит к увеличению силы трения, повышению нагрева и износа. Принимаем  $\bar{F} = 0,2 \dots 0,4$  Н/мм.

Эксплуатировать стандартные резиновые армированные манжеты рекомендуется при избыточном давлении до 0,05 МПа.

Определена толщина тонкостенной ремонтной втулки, обеспечивающая работоспособность соединения:

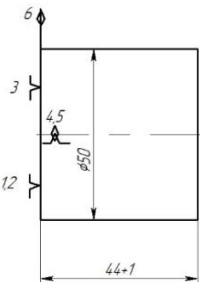
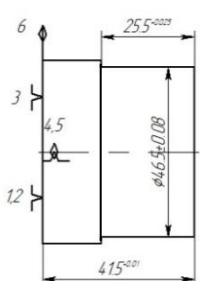
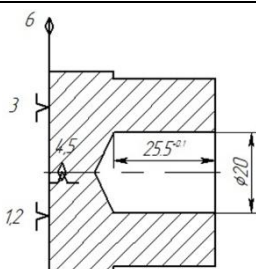
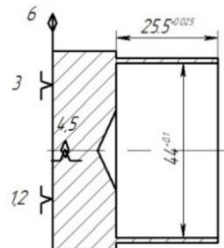
$$S_B = 0,2 \dots 0,8 \text{ мм.}$$

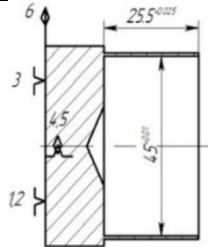
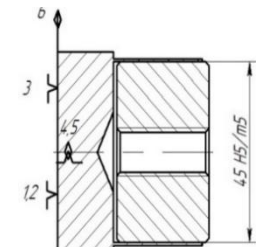
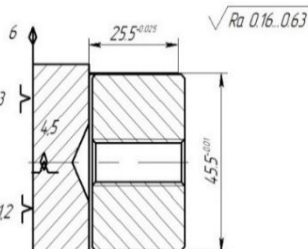
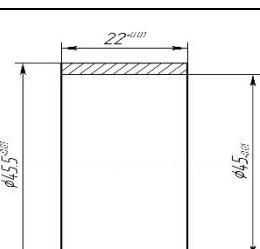
Минимальную толщину ремонтной втулки установили 0,25 мм (связано со сложностью изготовления детали).

На основании разработанного технологического процесса (таблица 1) изготовлены тонкостенные ремонтные втулки с  $S_B = 0,25\text{--}0,35$  мм из стали 40Х и стали AISI 321. Полученные результаты измерений шероховатости рабочей поверхности показали, что средняя шероховатость  $Ra$  рабочей поверхности втулок из стали 40Х составила более 0,63 мкм, что не соответствует требования ГОСТ 8752–79.

По результатам измерений шероховатости предложено использование ремонтных втулок из нержавеющей стали AISI 321 ( $Ra = 0,42 - 0,58$  мкм) для проведения дальнейших исследований с упрочнением поверхности и в качестве самостоятельных деталей.

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

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

|     |                                                                                                                                                                      |                                                                                     |                                                                        |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 020 | Токарная<br>1. Расточить диаметр $44 + 0,1$ мм в диаметр $45 + 0,01$ мм<br>2 прохода<br>Глубина 0,25 мм<br>Подача на оборот 0,05 мм/об<br>Скорость резания 335 м/мин |   | Токарный станок<br>FABTEC<br>СК6136/750<br>Расточной резец             |
| 021 | Токарная<br>1. Установить поддерживающую оснастку задней бабкой                                                                                                      |   | Токарный станок<br>FABTEC<br>СК6136/750<br>Поддерживающая оснастка (1) |
| 025 | Токарная<br>1. Проточить внешний диаметр в размер $45,5 + 0,01$ мм<br>2 прохода<br>Глубина 0,25 мм<br>Подача на оборот 0,05 мм/об<br>Скорость резания 335 м/мин      |   | Токарный станок<br>FABTEC<br>СК6136/750<br>Проходной упорный резец     |
| 030 | Токарная<br>1. Извлечь поддерживающую оснастку с помощью резьбовой рукоятки<br>2. Отрезать деталь в линейный размер $22 + 0,01$ мм<br>3. Острые кромки притупить     |  | Токарный станок<br>FABTEC<br>СК6136/750<br>Отрезной резец              |

Твердость материала, при которой разрушение рабочей поверхности детали невозможно, рассчитывается по формуле 18. Подставляя значения микротвердости оксида алюминия, как наиболее твердого элемента пыли, в формулу, получаем необходимое значение микротвердости рабочей поверхности 14700 МПа, обеспечивающее втулкам безыносную эксплуатацию в условиях пылевого облака.

По результатам исследований М.М. Хрущева, для минимизации абразивного изнашивания поверхностная твердость материала должна быть не ниже 17000 МПа.

На основании выбранных методов упрочнения изготовлены образцы ТРВ (рисунок 9) с параметрами, указанными в таблице 2.



а)

б)

в)

Рисунок 9 – Тонкостенная ремонтная втулка: а) без упрочнения;  
б) с упрочнением рабочей поверхности ХТВ21; в) с упрочнением рабочей поверхности TiN

Таблица 2 – Характеристики ТРВ

| Материал ТРВ /<br>Метод упрочнения                                          | Обозначение<br>покрытия | Шероховатость,<br><i>Ra</i> , мкм | Микротвердость<br>поверхности,<br>МПа |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Сталь AISI 321                                                              | нет                     | 0,42–0,58                         | 4080                                  |
| Сталь AISI 321 /<br>Электролитическое<br>покрытие (Хромирование<br>твердое) | Хтв 21                  | 0,11–0,19                         | 11000–12000                           |
| Сталь AISI 321 /<br>Физическое осаждение<br>PVD                             | TiN                     | 0,18–0,29                         | 18900–21700                           |

Шероховатость рабочих поверхностей всех деталей соответствует требованиям ГОСТ 8752–79, однако профилограммы показывают, что лучшим микрорельефом для обеспечения жидкостного трения обладает 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 Хтв 21 не способствует удержанию смазочного материала в зоне контакта, что должно привести к работе трибосоединения в условиях сухого трения в начале скольжения и при недостатке смазки в зоне контакта.

Для проведения стендовых испытаний изготовлены 4 вида трибосоединений. Внешний вид образцов для испытаний приведен на рисунке 10. Состав трибосоединений приведен в таблице 3.

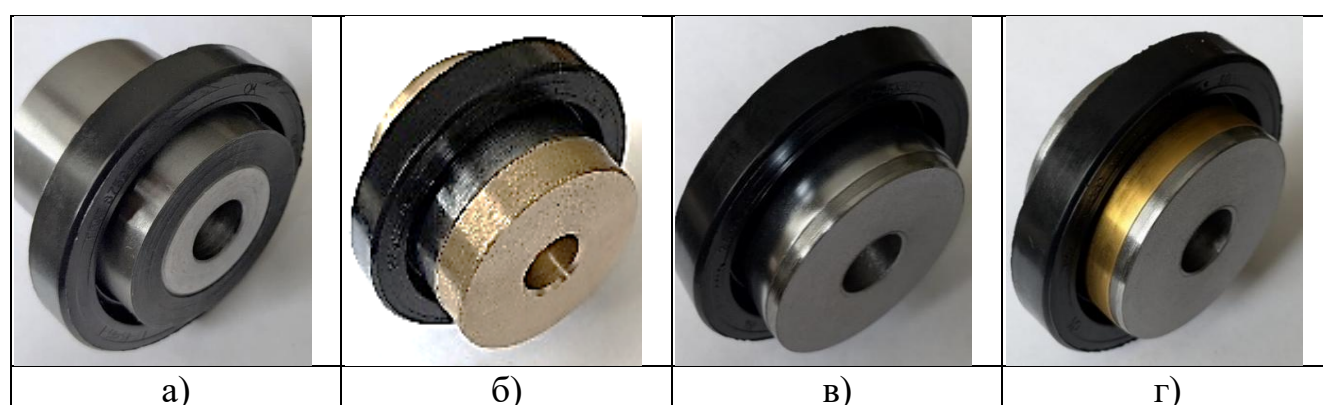


Рисунок 10 – Образцы трибосоединений: а) манжета и втулка из стали 45; б) манжета и ТРВ из стали AISI 321 без упрочнения рабочей поверхности; в) манжета и ТРВ с упрочнением рабочей поверхности Хтв 21; г) манжета и ТРВ с упрочнением рабочей поверхности TiN

Испытания рабочей поверхности втулок на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы подтвердили, что износостойкость рабочей поверхности детали зависит от ее твердости. Результаты испытаний приведены в таблице 4. Получены значения относительной износостойкости ( $K_n$ )

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 ( $K_H = 32,1$ ).

Таблица 3 – Трибосоединения для стендовых испытаний

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

Таблица 4 – Оценка износостойкости рабочей поверхности деталей

| Образец  | Потери массы g, мг           | Среднеарифметическое значение g, мг | Относительная износостойкость ( $K_H$ ) |
|----------|------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|
| Сталь 45 | 38,2; 40,1; 42,2; 41,0; 43,1 | 40,9                                | <b>1</b>                                |
| AISI 321 | 55,4; 55,4; 55,4; 55,5; 55,3 | 55,4                                | <b>0,74</b>                             |
| ХТВ21    | 42,4; 42,0; 40,5; 41,8; 41,5 | 41,6                                | <b>1,79</b>                             |
| TiN      | 1,6; 1,4; 2,1; 1,8; 1,5      | 1,7                                 | <b>32,1</b>                             |

Испытания для определения сил трения и температуры в зоне контакта втулки с манжетой выполняли с целью определения влияния рабочей поверхности тонкостенной ремонтной втулки на изменение силы трения в соединении «вал–манжета». Тонкостенные ремонтные втулки, изготовленные из стали AISI 321 и ТРВ из стали AISI 321, упрочненные TiN, показали трибологические свойства превосходящие свойства эталонных образцов на всех этапах испытаний – по силе трения пуска до 10%, по установившейся силе трения до 33 и 43 % соответственно (таблица 5).

Таблица 5 – Результаты испытаний определения сил трения и температуры

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

Испытания для определения износостойкости исследуемых соединений проводили с целью определения динамики изнашивания ремонтных тонкостенных втулок с различной рабочей поверхностью в соединении «вал–уплотнение».

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. Относительно эталонного образца соединения (втулка 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 (рисунок 11).

Относительно эталонного образца (втулка из стали 45) износ ТРВ упрочненной TiN составил около 10 %, ТРВ упрочненной Хтв21 – 112 %, ТРВ из стали AISI 321 без упрочнения – 135 %.

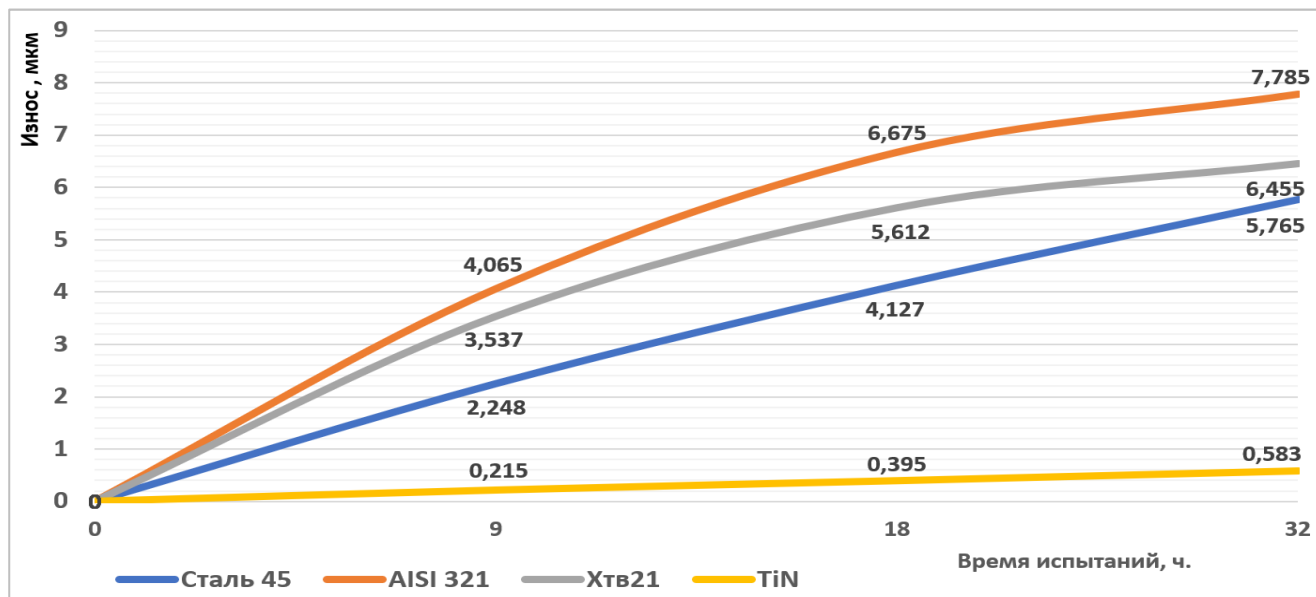


Рисунок 11 – Износ ТРВ при наличии абразива в смазочном материале

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 Хтв21 – 156%.

Данные, полученные в ходе эксперимента, показывают, что износ трибосоединения «вал–манжета» относительно эталонного образца (рисунок 12):

- с ТРВ с поверхностным упрочнением TiN уменьшился в 1,2 раза;
- с ТРВ из нержавеющей стали AISI 321 без упрочнения рабочей поверхности уменьшился в 1,1 раза;
- с ТРВ с поверхностным упрочнением Хтв21 увеличился в 1,6 раза.

Итоговые результаты длительных испытаний приведены в таблице 6.

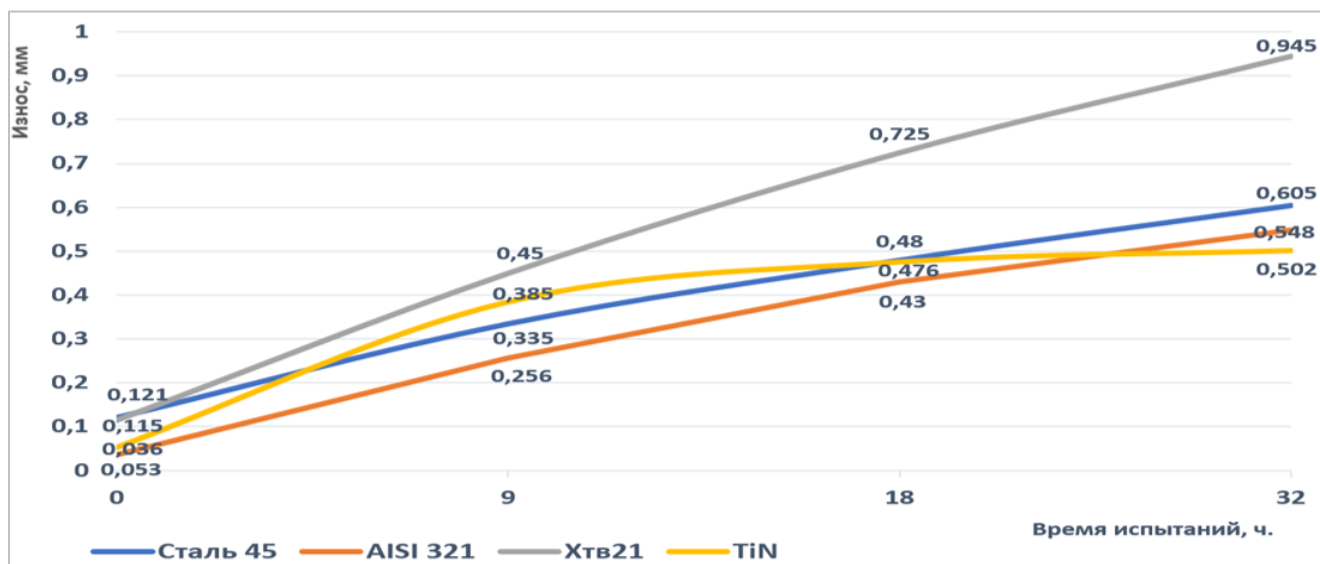


Рисунок 12 – Износ соединения «вал–манжета»

Таблица 6 – Износ соединения «вал–манжета».

| Соединение | Детали            | W п., мм     | W 9, мм      | W18, мм      | W32, мм      | Суммарный износ |
|------------|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|
| 1          | Втулка сталь 45   | нет          | 0,002248     | 0,004127     | 0,005765     | 0,611 мм        |
|            | Манжета           | 0,121        | 0,335        | 0,48         | 0,605        |                 |
|            | <b>Соединение</b> | <b>0,121</b> | <b>0,337</b> | <b>0,484</b> | <b>0,611</b> |                 |
| 2          | ТРВ (TiN)         | нет          | 0,000215     | 0,000395     | 0,000583     | 0,503 мм        |
|            | Манжета           | 0,053        | 0,385        | 0,476        | 0,502        |                 |
|            | <b>Соединение</b> | <b>0,053</b> | <b>0,385</b> | <b>0,476</b> | <b>0,503</b> |                 |
| 3          | ТРВ (Хтв 21)      | нет          | 0,003537     | 0,005612     | 0,006455     | 0,951 мм        |
|            | Манжета           | 0,115        | 0,45         | 0,725        | 0,945        |                 |
|            | <b>Соединение</b> | <b>0,115</b> | <b>0,454</b> | <b>0,731</b> | <b>0,951</b> |                 |
| 4          | ТРВ (A321)        | нет          | 0,004065     | 0,006675     | 0,007785     | 0,556 мм        |
|            | Манжета           | 0,036        | 0,256        | 0,43         | 0,548        |                 |
|            | <b>Соединение</b> | <b>0,036</b> | <b>0,26</b>  | <b>0,437</b> | <b>0,556</b> |                 |

Подтверждено, что при увеличении микротвердости рабочей поверхности детали, превышающей значение  $0,7H_a$  ( $H_a$  – твердость абразивной частицы), износ рабочей поверхности практически не происходит. При наличии абразива износ рабочей поверхности ТРВ с поверхностным упрочнением TiN составил 10% от износа эталонной втулки. 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%.

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».

«Гладкая» рабочая поверхность тонкостенной ремонтной втулки с поверхностным упрочнением Хтв 21 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. Износостойкость трибосоединения «вал–манжета», состоящего из манжеты и ТРВ с поверхностным упрочнением ХТВ 21 относительно эталонного образца уменьшилась на 64%.

Эксплуатационные испытания тонкостенных ремонтных втулок проводятся с 1 февраля 2025 года с целью проверки их работоспособности в реальных условиях эксплуатации. Исследования проводятся на базе предприятия СПК «КОЛОС». Тонкостенные ремонтные втулки установлены на полуоси шестерен передних ведущих мостов тракторов БЕЛАРУС–82.

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

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».

**В пятой главе «Расчетный экономический эффект»** для определения экономической эффективности проведен расчет изготовления тонкостенной ремонтной втулки, который показал, что стоимость тонкостенной ремонтной втулки без упрочнения составляет 430 рублей. Эта деталь может использоваться самостоятельно в качестве ТРВ для проведения срочного ремонта в полевых условиях. Для обеспечения длительной работы соединения «вал–манжета» предлагается использовать ТРВ с поверхностным упрочнением TiN. Себестоимость упрочнения ТРВ методом PVD составила 150 рублей на одну деталь.

Стоимость разработанных тонкостенных втулок для восстановления соединений «вал–манжета» подшипниковых узлов сельскохозяйственных машин составляет в 16 раз меньше 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 эталонного 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.

#### **Научные статьи, опубликованные в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ**

1. 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.

2. 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.

3. 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.

#### **Публикации в изданиях, индексируемых в международных цитатно-аналитических базах данных**

Melnikov, O. M. Influence of the Band Spring Pressure on the Contact Load in the Shaft–Seal Connection / O. M. Melnikov, N. V. Serov, A. V. Lapaev // Technical Physics. – 2025. – Vol. 70, No. 3. – P. 80-83. – DOI 10.1134/S1063784225700185. – EDN QHJBCH.