

На правах рукописи

НЕСТЕРКИН Геннадий Алексеевич

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТИ
ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ПОВЕРХНОСТИ ВАЛА СОЕДИНЕНИЯ
«ВАЛ - УПЛОТНЕНИЕ»**

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 метрологии, стандартизации и управления качеством Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева».

- Научный руководитель** **Леонов Олег Альбертович,**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой метрологии, стандартизации и управления качеством ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»
- Официальные оппоненты:** **Яковлев Сергей Александрович,**
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии производства и ремонта машин ФГБОУ ВО Ульяновский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина
- Задорожний Роман Николаевич,**
кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник – руководитель ЦКП «Нано-центр» ФГБНУ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ
- Ведущая организация** ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева»

Защита состоится «17» апреля 2025 года в 13:00 на заседании диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел: 8 (499) 976-17-14.

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

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

Автореферат разослан «__»_____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета _____ Н.Н. Пуляев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время важную роль играет система импортозамещения техники и технологий в Российской Федерации. Причем импортозамещение можно рассматривать как с позиции создания новых машин и оборудования, так и с позиции ремонта существующей техники. Практически все машины для сельского хозяйства, созданные в Российской Федерации, являются ремонтпригодными, в отличие от импортных. Использование зарубежной техники становится для сельхозтоваропроизводителей нерентабельным, так как любая поломка оборачивается не только покупкой дорогой запасной части, но долгим временем ожидания, что наносит определенный ущерб в виде потерь от простоя машины.

На сегодняшний день около 80 % машинно-тракторного парка России находится за пределами срока амортизации. Решением проблемы поддержания работоспособности такой техники является повышение качества ее ремонта на основе разработки технологий и технических средств, обеспечивающих повышение ресурса отремонтированных агрегатов до 100 % новых изделий, при цене 50...70 % от новых.

Уплотнительные соединения с резиновыми армированными манжетами широко распространены в отечественной технике, в частности в коробках передач и редукторах сельхозмашин. Отказы данных соединений встречаются довольно часто и проявляются в виде утечек уплотняемых жидкостей.

Например, по данным самого массового производителя силовых агрегатов (двигателей и коробок передач) – Ярославского моторного завода, известно, что в процессе эксплуатации двигателей ЯМЗ при наработке свыше 8-10 тыс. часов, на поверхности коленчатого вала под рабочими кромками передней и задней манжет появляется кольцевой износ на глубину до 0,2 мм, приводящий к течи масла. Замена старой манжеты на новую при таком износе течь масла не устраняет.

Применению методов взаимозаменяемости с одновременным использованием простых методов восстановления вала в соединении его с манжетой посвящена данная работа.

Настоящие исследования выполнены в рамках Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства на 2017 - 2030 годы» на кафедре метрологии, стандартизации и управления качеством ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

Степень разработанности. Большой вклад в развитие теории и практики технического обслуживания и ремонта сельскохозяйственных машин, повышения их надежности внесли такие ученые, как А.А. Аникин, А.Н. Батищев, В.Н. Бугаев, Е.Л. Воловик, В.А. Деев, О.Н. Дидманидзе, М.Н. Ерохин, С.П. Казанцев, Ю.А. Конкин, В.Е. Кряжков, В.В. Курчаткин, С.С. Некрасов, А.В. Поляченко, Г.К. Потапов, Е.А. Пучин, М.Ф. Сагач, А.И. Сидоров, В.Я. Сквородин, Н.Ф. Тельнов, В.И. Цыпцин, С.С. Черепанов, В.И. Черноиванов, М.А. Халфин и др. ученые. В разработку методик расчета отклонений размеров деталей и соединений сельхозмашин большой вклад внесли В.М. Белов,

Ф.Х. Бурумкулов, И.Г. Голубев, З.С. Дагис, М.Н. Ерохин, А.И. Иванов, П.А. Карепин, А.А. Куликов, В.В. Карпузов, П.П. Лезин, П.П. Лельчук, О.А. Леонов, В.П. Лялякин, В.М. Михлин, А.Г. Степанов, Л.К. Чеплан и др. ученые. Но вопросы применения методов взаимозаменяемости при восстановлении поверхности вала соединения «вал - уплотнение» решены еще не полностью.

Целью работы является обоснование использования методов взаимозаменяемости при формировании соединения манжеты с валом при ремонте сборочных единиц в совокупности с рациональными способами восстановления вала соединения «вал – уплотнение».

Поставленная цель достигается решением следующих основных задач:

1. Разработать методику комплектования деталей соединений «вал-уплотнение», включающую в себя расчет числа групп комплектации, назначение ремонтных размеров вала и подбор манжет по критерию сохранения наименьшего натяга в соединении. Разработать методику расчета посадок с натягом для восстановления поверхности вала под манжету методом установки тонкостенных втулок.

2. Для соединения валов с манжетами коробки передач ЯМЗ-239 в виде соединений первичного вала и фланца определить количество ремонтных размеров валов и составить комплектовочную таблицу сборки валов с манжетами. Провести вероятностный расчет качества сборки соединений.

3. Апробировать методику расчета посадок тонкостенных втулок с целью восстановления поверхности первичного вала коробки передач ЯМЗ-239 под манжету, опередить размеры тонкостенной втулки, рассчитать диапазон технологических натягов и выбрать рациональные посадки.

4. Определить ожидаемый экономический эффект от внедрения технологического процесса восстановления вала соединения «вал – уплотнение» обработкой под ремонтный размер с последующим ППД взамен приобретения новых валов и экономический эффект от внедрения технологического процесса восстановления вала соединения «вал – уплотнение» методом установки ремонтных втулок.

Объект исследований – соединения «вал - уплотнение» коробки передач ЯМЗ, широко применяемых в отечественной сельскохозяйственной и автомобильной технике.

Предмет исследований – вопросы обеспечения норм точности и взаимозаменяемости при ремонте вала соединения «вал – уплотнение».

Научная новизна. Получены зависимости для расчета ремонтных размеров валов и диаметров подбираемых к ним манжет с целью обеспечения заданного диапазона натягов в соединении. Для метода восстановления поверхности вала путем применения тонкостенной втулки, на основе безмоментной теории оболочек, получены теоретические зависимости для расчета и корректировки предельных натягов.

Теоретическая значимость. Разработана методика расчета количества ремонтных размеров вала и подбора манжет с целью сохранения наименьшего натяга соединения манжеты с валом, также разработана методика расчета и вы-

бора посадок с натягом для восстановления поверхности вала под манжету методом установки тонкостенных втулок.

Практическая значимость работы заключается:

в рекомендации к внедрению в ремонтное производство системы ремонтных размеров вала с подбором манжет при ремонте коробок передач ЯМЗ-239;

в рекомендации к внедрению технологии восстановления поверхности вала методом установки ремонтной втулки с научно обоснованными точностными параметрами соединения «тонкостенное кольцо – вал» и использования оставшихся манжет.

Результаты исследований используются в учебном процессе – разработано практическое занятие «Расчет натягов при восстановлении размеров деталей методом использования тонкостенных ремонтных втулок».

Методы исследований выбирались на основе системного подхода к объекту исследований с использованием методов математического анализа, элементов теории взаимозаменяемости, теории вероятностей и математической статистики и теории сопротивления материалов. Применялась современные контрольно - измерительные приборы и стенды.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработка и апробация методики расчета количества ремонтных размеров вала с подбором манжет при условии обеспечения наименьшего натяга и ресурса соединения;

2. Разработка и апробация методики расчета наибольшего и наименьшего натягов в соединении по безмоментной теории оболочек при восстановлении поверхности вала под манжету методом установки тонкостенной ремонтной втулки.

Достоверность результатов работы обеспечена использованием положений науки о взаимозаменяемости, элементов вероятности, теории прочности, заданной величиной доверительной вероятности (не ниже 0,95) и допускаемой величиной ошибки вычислительных операций (до 3 %).

Реализация результатов работы. Результаты теоретических и экспериментальных исследований рассмотрены и приняты к внедрению на ООО «Завод АГРОМАШ», а также рекомендованы к внедрению Российской ассоциацией производителей специализированной техники и оборудования «РОССПЕЦМАШ», что подтверждено соответствующими актами.

Личный вклад автора в решение поставленных задач заключается в постановке задач, участии в проведении теоретических и экспериментальных исследований, в проведении расчетов, измерений и обработке полученных результатов, подготовки публикаций по выполненной работе.

Апробация результатов исследований. Основные положения и результаты исследований обсуждены и одобрены:

на Международном научно-практическом семинаре «Чтения академика В. Н. Болтинского» (г. Москва, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2024 г.);

на Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Шарова Николая Михайловича (г. Москва, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2024 г.);

на Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Реинжиниринг и цифровая трансформация эксплуатации транспортно-технологических машин и робототехнических комплексов», посвященной 100-летию со дня рождения ветерана Великой Отечественной Войны, заслуженного деятеля науки и техники, заслуженного изобретателя РФ, д.т.н., профессора Николая Федоровича Тельнова (г. Москва, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2024 г.);

на V Международной научной конференции «Модернизация, инновации, прогресс (МИП-V-2023)», организованной общественным учреждением «Красноярский краевой Дом науки и техники Российского союза научных и инженерных общественных объединений» (г. Красноярск, 2023 г.);

на IV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием: «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (г. Тула, Тульский государственный университет, 2023 г.);

на Международном научно-практическом семинаре «Чтения академика В. Н. Болтинского» (г. Москва, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2023 г.);

на заседаниях кафедры метрологии, стандартизации и управления качеством и научных конференциях профессорско-преподавательского состава и аспирантов ФГОУ ВПО МГАУ имени В.П. Горячкина (г. Москва, 2021...2024 гг.).

Публикации. Основные положения теоретических исследований и практических рекомендаций по теме диссертации опубликованы в 9 научных работах, в том числе в 3 статьях в центральных журналах, рекомендованных ВАК РФ, в 1 статье в международной базе Scopus и 4 тезисах доклада. Также имеется 1 программа на ЭВМ, прошедшая государственную регистрацию.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 126 наименований и приложения. Диссертация изложена на 128 страницах и содержит 22 таблиц и 31 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформирована цель и задачи исследований, изложена научная новизна и практическая значимость работы, а также основные положения диссертации, выносимые на защиту.

В первой главе «Состояние вопроса и задачи исследований» проведен анализ современного состояния парка сельскохозяйственной техники России, рассмотрены современные способы восстановления деталей и их классификация, проанализированы точностные методы обеспечения качества ремонта, рассмотрена классификация и применяемость уплотнительных устройств в сельскохозяйственной технике, приведены общетехнические требования к манжетам и валам, проведен анализ механизма изнашивания соединения и способов восстановления поверхности вала под манжету.

Во второй главе «Теоретические основы применения методов взаимозаменяемости при восстановлении поверхности вала соединения «вал - уплотнение» проведена разработка методики формирования системы ремонтных размеров вала и подбора манжет, а также рассмотрены теоретические положения применения метода запрессовки тонкостенных ремонтных втулок при восстановлении соединений «вал – уплотнение».

Наряду с параметрами износостойкости существенную роль в обеспечении надежности и долговечности работы соединений с резиновыми армированными манжетами играют параметры точности, такие как допуски размеров, отклонения и допуски посадок. При этом рациональное обоснование норм точности необходимо использовать как при финишной обработке деталей под ремонтный размер, так и при восстановлении поверхностей под номинальный размер путем постановки дополнительных деталей.

Применение ремонтных размеров деталей соединения – это один из методов восстановления работоспособности изношенных деталей. Он заключается в том, что изношенная деталь обрабатывается до заранее рассчитанного размера, после чего для неё подбирается или изготавливается ремонтная деталь (втулка, плёнка, уплотнение и т. д.).

Применение ремонтных размеров позволяет:
 восстановить геометрическую форму и размеры детали;
 обеспечить необходимую шероховатость поверхности;
 обеспечить функциональную взаимозаменяемость.

При ремонте вала необходимо не только удалить следы износа, но и учесть припуск на обработку. Это объясняется изнашиванием поверхности вала и значительным искажением его геометрической формы (рисунок 1).

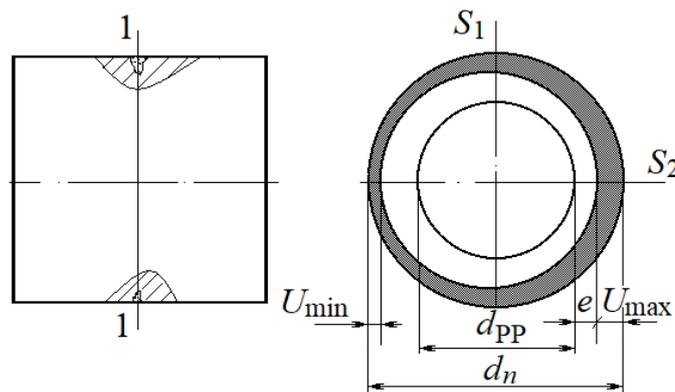


Рисунок 1 – Связь ремонтного размера вала с износом и припуском:
 1-1 – измеряемое сечение; S_1 , S_2 – измеряемые плоскости

В результате анализа рисунка 1, была получена усовершенствованная зависимость для расчета ремонтного размер вала

$$d_{pp} = (d_n + es - e) - \frac{2 \cdot \beta \cdot U}{1 + \beta}, \quad (1)$$

где d_n – номинальный диаметр, мм; es – верхнее отклонение, мм; $\beta = U_{max}/U_{min}$ – коэффициент неравномерности износа; e – припуск на обработку, мм; U_{max} и

U_{\min} – наибольший и наименьший износ на сторону; $U = U_{\max} + U_{\min}$ – диаметральный износ вала, мм.

Валы, обработанные под ремонтный размер, определенный по зависимости (1), можно соединять с новыми манжетами. Но при этом в полученных соединениях не будет обеспечен наименьший конструктивный натяг, необходимый для обеспечения долговечности соединения, так как произошло уменьшение размера вала.

При единичном и мелкосерийном производстве применяется сплошная дефектация валов, поэтому рекомендуется использовать методику комплектации соединений путем использования группы ремонтных размеров (РР). Число ремонтных размеров в группе можно определить следующим образом:

$$n = \frac{\omega_{d_{изн}}}{T_d + (m - ei)}, \quad (2)$$

где m – шаг между ремонтными размерами, ei – наименьшее отклонение вала, мм.

Для обеспечения равенства натягов нового и восстановленного соединения, манжеты к валам ремонтных размеров должны подбираться по внутреннему диаметру (рисунок 2). Верхнее отклонение от номинального размера манжет, устанавливаемых на валы ремонтных размеров, можно рассчитать по формуле:

$$ES'_{\max} = ES_{\max} - (d_n - d_{PP}). \quad (3)$$

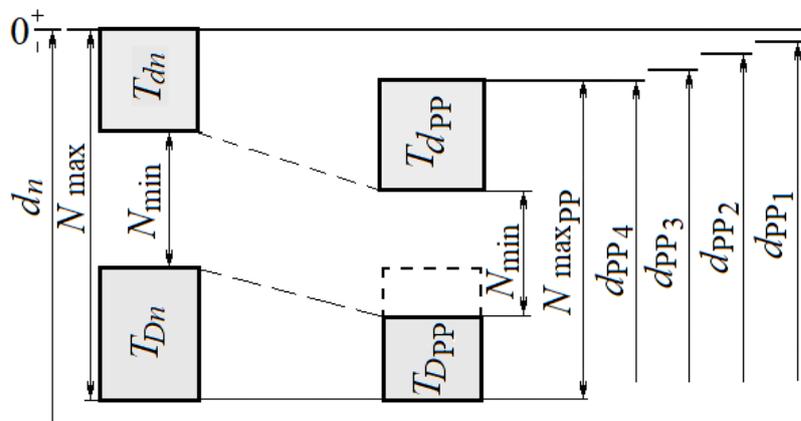


Рисунок 2 – Обоснование сортировки манжет по внутреннему диаметру при постановке на валы ремонтного размера (с целью сохранения наименьшего конструктивного натяга)

При таком подходе будет обеспечена функциональная взаимозаменяемость, и эксплуатация отремонтированного соединения вала с манжетой начнется в заданных пределах конструктивных натягов резиновой армированной манжеты на вал.

Запрессовка втулок намного экономичнее таких способов восстановления как наплавка и приварка контактной ленты, т.к. не расходуется электроэнергия и не приобретается дорогостоящее оборудование. Формирование поверхности вала происходит автоматически – упругая втулка «копирует» поверхность вала, рисунок 3.

Поверхность втулки можно моделировать по твердости, шероховатости поверхности, обработке ППД, поэтому все вышеприведенные расчеты точности остаются актуальными и для данного способа восстановления.

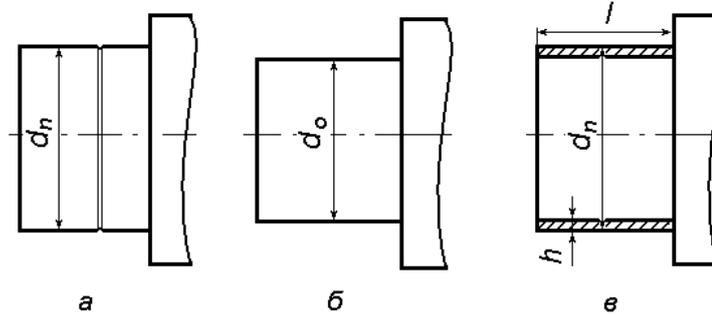


Рисунок 3 – Этапы формирования соединения с ремонтной втулкой:

- a* – исходная изношенная поверхность вала под манжету;
- б* – вал, обработанный на толщину втулки;
- в* – соединение вала и тонкостенной втулки

Использование классической методики расчета натягов в соединении дает большие искажения в расчетах при применении ее для тонкостенных втулок.

В случае, когда охватывающая или охватываемая детали являются тонкостенными – при отношении толщины стенки к диаметру $h/D < 0,2$, расчет величины натяга в соединении целесообразно осуществлять по безмоментной теории оболочек, где натяг определяется по формуле

$$N = \frac{p}{2} \left[\frac{D_1^2}{E_1 h_1} + \frac{D_2^2}{E_2 h_2} \right], \quad (4)$$

где D_1 и D_2 – срединные диаметры, м; h_1 и h_2 – толщина каждой оболочки, м; E_1 и E_2 – модули упругости материала вала и втулки, Па.

Наименьшее давление p_{\min} на контактируемых поверхностях, необходимое для передачи крутящего момента $M_{\text{кр}}$, можно определить по формуле

$$p_{\min} = \frac{2 \cdot M_{\text{кр}}}{\pi \cdot d_n^2 \cdot l \cdot f}, \quad (5)$$

где f – коэффициент трения; l – длина соединения, м; d – диаметр соединения, м.

Тогда наименьший натяг можно определить по выражению, которое образуется путем подстановки зависимости (5) в формулу (4):

$$N_{\min} = \frac{M_{\text{кр}}}{\pi \cdot d_n^2 \cdot l \cdot f} \left[\frac{D_1^2}{E_1 h_1} + \frac{D_2^2}{E_2 h_2} \right], \quad (6)$$

Наибольшее давление p_{\max} на контактируемых поверхностях, определяется по формуле:

$$p_{\max} = \frac{2h}{D} \sigma_{\text{доп}}, \quad (7)$$

где $\sigma_{\text{доп}}$ – предельное допускаемое давление, Па.

Тогда наибольший натяг можно определить по выражению, которое образуется путем подстановки зависимости (7) в формулу (4):

$$N_{\max} = \sigma_{\text{доп}} \frac{2h}{D} \left[\frac{D_1^2}{E_1 h_1} + \frac{D_2^2}{E_2 h_2} \right], \quad (8)$$

Предельные расчетные натяги должны быть скорректированы исходя из условий сборки. В реальных условиях предельные технологические натяги определяются по выражениям:

$$N_{T\max} = k \cdot N_{P\max} + \Delta N_R + \Delta N_t, \quad (9)$$

$$N_{T\min} = N_{P\min} + \Delta N_R + \Delta N_t, \quad (10)$$

где ΔN_R – поправка на смятие шероховатости поверхности вала и втулки при сборке; ΔN_t – поправка на температурное расширение деталей; k – коэффициент, в котором учтено увеличение удельного давления у торцов втулки;

Поправку на смятие шероховатости можно определить по формуле

$$\Delta N_R \leq 2 \cdot k_R \cdot (R_{ad} \cdot \eta_d + R_{aD} \cdot \eta_D), \quad (11)$$

где k_R – коэффициент перевода параметра R_a в R_z ; η – общий коэффициент смятия шероховатости поверхностей или отдельно вала η_d и отверстия η_D ; $T_N = N_{P\max} - N_{P\min}$ – расчетный допуск посадки; K_ϕ и K_K – коэффициенты, в которых учтена погрешность формы и предполагаемый квалитет; R_{ad} , R_{aD} – параметры шероховатости вала и отверстия.

В третьей главе «Методы и средства экспериментальных исследований» рассмотрены теоретические основы проведения микрометрирования и дефектации поверхностей валов под манжету при ремонте, методика контроля поверхности нового и изношенного вала, а также диаметра новых манжет.

Для дефектации поверхности вала под манжету предложено использовать микрометр со специальными вставками или с острыми наконечниками. Разработаны методики измерений размеров валов при дефектации и для контроля качества восстановленных поверхностей валов под втулку и при обработке под ремонтные размеры. Для условий восстановления поверхности вала с помощью использования тонкостенных втулок, выбраны средства измерений для контроля обработанной под втулку поверхности вала $\varnothing 50,5s6$ – скоба рычажная СРП-75-0,001 повышенной точности с величиной отсчета 0,001 мм, а для отверстия втулки $\varnothing 50,5H6$ – нутромер индикаторный электронный НИЦ повышенной точности 50-100 0,001. Для контроля поверхности вала после восстановления выбраны средства измерений: для наружного диаметра фланца $d_n = \varnothing 100h10_{(-0,14)}$ – рычажный микрометр МР-100-0,002; для первичного вала коробки передач $d_n = \varnothing 52h10_{(-0,12)}$ рычажный микрометр МР-75-0,002.

Для определения внутреннего диаметра манжеты рекомендовано использовать двухкоординатный измерительный прибор ДИП-6 с оптико-электронной измерительной системой НИИК-890.

В четвертой главе «Результаты исследований и их анализ» приведены результаты апробации разработанных методик.

Надежность современных уплотнительных узлов сельскохозяйственной техники недостаточна. Вследствие износа поверхности вала и манжеты при

эксплуатации уменьшаются натяги в подвижном соединении, что приводит к началу утечек и отказу узла. Утечки технических жидкостей в агрегатах составляют 20...30 % от общего числа отказов, в межремонтный период отказы уплотнений встречаются в 1,5 раза чаще, чем у новой техники. При ремонте сельскохозяйственной техники все уплотнения подлежат замене и от 10 до 80 % сопряженных с ними деталей требуют замены или восстановления. Дорогостоящие методы ремонта, такие как наплавка под слоем флюса или в среде углекислого газа в настоящее время не применяются, так как ремонтное производство утратило массовость – техника стала надежнее, отказов стало меньше и при ремонте чаще всего стали применяться наиболее простые и дешевые средства восстановления деталей, такие как замена на новую, обработка под ремонтный размер или постановка дополнительной детали – компенсатора. Рассмотрим применение этих простых способов восстановления работоспособности уплотнительных узлов сельскохозяйственной техники.

Для исследований были отобраны 100 изношенных первичных валов коробки передач ЯМЗ-239 и 100 новых манжет 1.2-52×72-8. Проведены измерения изношенной поверхности вала под манжету, и внутренних диаметров отверстий манжет (таблица 1, рисунки 4, 5).

Таблица 1 – Параметры рассеяния диаметров изношенных валов и новых манжет

Параметры распределения	Манжеты (новые)	Валы (изношенные)
Среднее арифметическое, мм	49,5875	51,806
Среднее квадратическое отклонение, мм	0,177	0,109
Зона рассеяния, мм	1,060	0,655

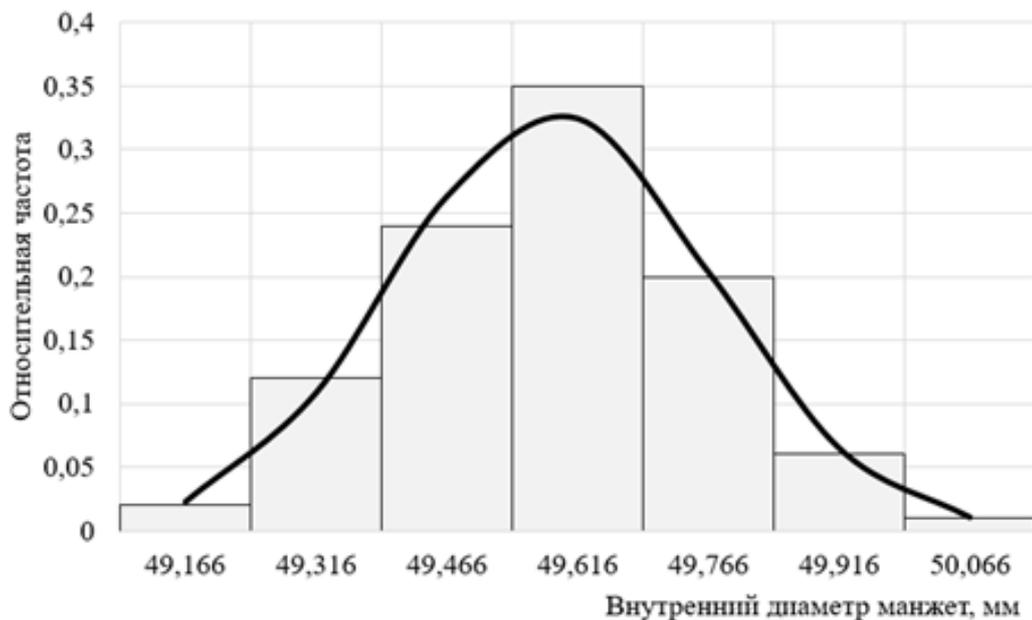


Рисунок 4 – Распределение внутренних диаметров новых манжет

Из рисунка 4 видно, что распределение внутренних диаметров новых манжет находится в пределах допуска и все измеренные манжеты являются годными.

Из рисунка 5 видно, что износ поверхности вала под манжету достигает величины 0,5 мм, но большая часть распределена ближе к номинальному размеру – $\varnothing 52h10_{(-0,12)}$. Вероятность появления валов, имеющих износ поверхности под манжету менее допустимого 51,7 мм, составила 34 %.

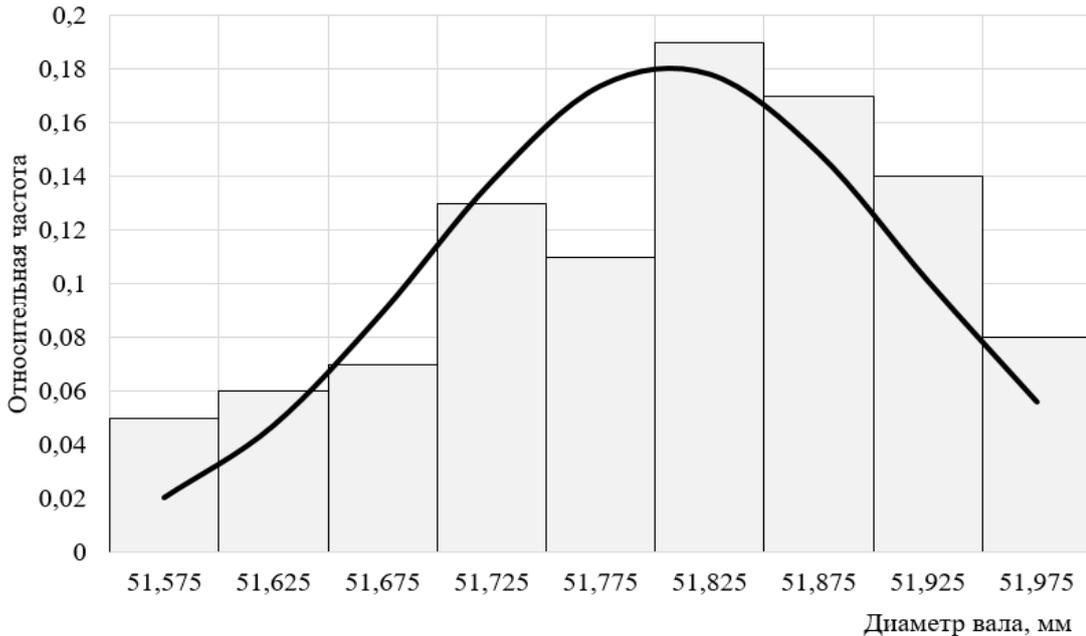


Рисунок 5 – Распределение изношенной поверхности вала под манжету

При сборке валов с новыми манжетами разброс натягов в пределах $\pm 3\sigma$ составит от 1,7 мм до 3 мм, при этом граница наименьшего натяга, равного 2 мм, будет нарушена у 15% соединений. Остальные 67% валов могут быть обработаны под ремонтный размер 51,4 мм, определенный по формуле (1) – до выведения следов износа с учетом припуска на обработку. В этом случае, в соединениях новых манжет с валами, обработанными под ремонтный размер, разброс натягов в пределах $\pm 3\sigma$ составит от 1,6 мм до 3 мм, при этом граница наименьшего натяга равного 2 мм будет нарушена у 20% соединений.

Применим предлагаемую методику комплектации, для этого рассчитаем число ремонтных размеров валов в группе по формуле (2) и определим отклонения внутренних диаметров манжет по критерию сохранения наименьшего конструктивного натяга для каждого ремонтного размера. В результате расчета получим $n = 3,7$, поэтому примем количество ремонтных размеров $n = 4$ и составим комплекточную таблицу 2. Используя характеристики полученных рассеяний, таблица 1, определим вероятности появления валов и манжет в каждой размерной группе, и определим вероятности появления соединений по каждой группе (таблица 3).

Таблица 2 – Комплектовочная таблица для соединения «вал-уплотнение»

Ремонтный размер, мм		Маркировка	Припуск на обработку	Размеры подбираемых манжет, мм
при расчете по допуску	при расчете по зоне рассеяния			
51,8 _{-0,12}	51,8 _{-0,072}	1P	0,05	52 ^{-2,2} _{-3,0}
51,7 _{-0,12}	51,7 _{-0,072}	2P	0,05	52 ^{-2,3} _{-3,0}
51,6 _{-0,12}	51,6 _{-0,072}	3P	0,05	52 ^{-2,4} _{-3,0}
51,5 _{-0,12}	51,5 _{-0,072}	4P	0,05	52 ^{-2,5} _{-3,0}

Таблица 3 – Вероятности появления валов и манжет, попадающих в ремонтную группу при комплектовании

Ремонтная группа	Диапазоны размеров валов, мм	Вероятность, появления валов	Диапазоны размеров манжет, мм	Вероятность появления манжет
1P	51,85 и более	0,34	49,0...49,8	0,88
2P	51,85...51,75	0,35	49,0...49,7	0,73
3P	51,75...51,65	0,23	49,0...49,6	0,53
4P	51,65 и менее	0,07	49,0...49,5	0,31

Из таблицы 3 видно, что при применении предлагаемой методики вероятность появления соединений с гарантированным натягом не менее 2 мкм составляет 88 % (так на 100 % валов, обработанных под ремонтные размеры, хватает 88 % манжет), что свидетельствует о незавершенной сборке.

Для повышения процента сборки соединений следует закупать на 12...15 % больше манжет, чем обрабатываемых под ремонтный размер валов. Остальные манжеты (12 %) могут быть собраны с новыми валами, которые заменяют выбракованные валы в процессе дефектации по другим причинам.

Рассмотрим предлагаемую методику и на примере подбора манжет под ремонтные размеры фланцев коробки передач ЯМЗ, для этого назначим четыре ремонтных размера по диапазону износа и определим отклонения внутренних диаметров манжет по критерию сохранения наименьшего конструктивного натяга. При этом учтем тот факт, что для обеспечения требуемой для резиновых армированных манжет шероховатости поверхности необходимо проводить такую финишную обработку, как чистовое шлифование, при котором с запасом достигается точность по 8-му качеству, где допуск на размер при диаметре 100 мм равен 54 мкм. В результате расчета и ввода нового качества составим комплектовочную таблицу 4.

Наименьший натяг (таблица 4) в соединении будет равен 1,946 мм, что выше нормируемого значения 1,86 мм, в результате предлагаемой комплектации и обработки вала под рациональный допуск по 8-му качеству достигается увеличение наименьшего натяга, что положительно отразится на долговечности отремонтированного соединения.

Таблица 4 – Комплектовочная таблица для соединения фланцев с манжетами коробки передач ЯМЗ-239

Размер вала (фланца) с отклонениями, мм	Маркировка	Отклонения подбираемых манжет, мм	Натяг в соединении, мм
100h8 _(-0.054)	H	100 ^{-2.0} _{-3.0}	+1,946...+3,000
99,8 _{-0.054}	1P	100 ^{-2.2} _{-3.0}	+1,946...+3,000
99,7 _{-0.054}	2P	100 ^{-2.3} _{-3.0}	+1,946...+3,000
99,6 _{-0.054}	3P	100 ^{-2.4} _{-3.0}	+1,946...+3,000
99,5 _{-0.054}	4P	100 ^{-2.5} _{-3.0}	+1,946...+3,000

При среднесерийном ремонтном производстве, когда необходимо достичь определенного такта производства и унификации процессов, можно использовать только второй ремонтный размер 99,7_{-0.054}, и заранее подбирать манжеты только по одному виду верхнего отклонения. Остальные манжеты из партии могут быть соединены с новыми фланцами, которые будут идти на замену выбракованных в процессе дефектации по другим причинам (износ шлицев, износ отверстий и т.д.).

Таким образом, разработана и апробирована методика комплектования деталей соединений «вал-уплотнение», включающая в себя расчет числа групп и назначение ремонтных размеров вала и подбор манжет по критерию сохранения наименьшего натяга в соединении, которая применима для восстановления всех соединений типа «вал-уплотнение», где уплотнением является стандартная резиновая армированная манжета (ГОСТ 8752-79). Перед расчетом ремонтных размеров необходимо провести анализ величин износа валов.

Одним из способов восстановления изношенной поверхности под номинальный размер является метод установки ремонтных втулок. Этот метод нашел широкое применение при ремонте различных деталей, в том числе может быть использован и для восстановления поверхности вала под манжету. Авторизованный дистрибьютер SKF реализует тонкостенные втулки толщиной 0,28±0,05 мм, которые изготовлены из запатентованного материала, имеющие высокие характеристики пластичности и прочности, также он обладает хорошей износостойкостью. Но данная технология вызывает определенные вопросы. Так, для входного вала КПП ЯМЗ 239, имеющего диаметр под манжету Ø52h10_(-0,12), размер внутреннего диаметра втулки SKF с маркировкой CR 99204 будут составлять 51,99 мм. Возникает вероятность проворачивания втулки на валу из-за наличия зазора, хотя на поверхность вала можно нанести герметик или эпоксидный клей. Но самый главный недостаток такой конструкции - прирост диаметра вала на 0,56±0,1 мм, а т.к. резиновая армированная манжета имеет пружину, давление кромки на вал возрастет, и износ манжеты увеличится.

Установка с натягом тонкостенных ремонтных втулок, обработанных под номинальный размер, таких вопросов не вызывает. Поверхность втулки можно моделировать по материалу, твердости, шероховатости поверхности, обработке

ФАБО, ППД и др. способами. Под такие втулки необходимо обрабатывать вал на обоснованный меньший размер и формировать посадку втулки на вал с заданными натягами, диапазон которых требуется научно обосновать.

Установка втулок с натягом экономичнее таких способов восстановления как наплавка и приварка контактной ленты, т.к. не расходуется электроэнергия и не приобретается дорогостоящее оборудование. Формирование поверхности вала происходит автоматически – упругая втулка «копирует» поверхность вала.

Для соединений вала с манжетой первичного вала коробки передач ЯМЗ-239 следует определять диаметр и толщину тонкостенной втулки исходя из конструктивных особенностей вала. Вал имеет диаметр 25 мм под подшипник, далее диаметр 50 мм под шлицевое соединение со сцеплением и далее 52 мм под уплотнение. Для гарантированного прохода втулки через шлицевую поверхность вала при монтаже, ее внутренний диаметр должен быть не менее 50,5 мм.

Используя формулы (6) и (8), проведен расчет величин давлений, натягов и поправок для соединения тонкостенной втулки с первичным валом $\varnothing 50,5$ коробки передач ЯМЗ-239, с целью формирования восстановленного соединения поверхности вала под манжету $\varnothing 52h10$. Исходные данные и результаты расчета сведены в таблицу 5.

Таблица 5 – Расчет натягов для соединений «вал – втулка»

Параметр	Ед. изм.	Обозначение	Значение для соединения «вал – уплотнение» $\varnothing 52h10$
Диаметр соединения	м	d_n	0,052
Длина соединения	м	l	0,009
Толщина оболочки вала	м	h_1	0,026
Толщина оболочки втулки	м	h_2	0,00075
Диаметр вала (после обработки)	м	d_n	0,0505
Отношение h/D	–		0,015
Срединный диаметр втулки	м	D_2	0,05125
Срединный диаметр вала	м	D_1	0,026
Наибольшая сила резания при шлифовании	Н	$P_{рез}$	700
Коэффициент трения	–	f	0,1
Наибольший крутящий момент	Н·м	$M_{кр}$	8,75
Модуль упругости вала (Сталь)	Па	E_d	2E+11
Модуль упругости втулки (Сталь)	Па	E_D	2E+11
Предел текучести вала	Па	$[\sigma_T]_d$	363000000
Предел текучести втулки	Па	$[\sigma_T]_D$	363000000
Наименьшее давление	Па	p_{rmin}	2428192,62
Наибольшее допустимое давление	Па	p_{max}	10782178,22
Наименьший расчетный натяг	мкм	N_{Pmin}	21,42
Наибольший расчетный натяг	мкм	N_{Pmax}	95,10
Шероховатость поверхности вала	мкм	R_{ad}	0,63
Шероховатость поверхности втулки	мкм	R_{aD}	1,25
Поправка на смятие шероховатости	мкм	ΔN_R	7,55
Рабочая температура	°С	t	-40 ... +100
Наименьший технологический натяг	мкм	N_{Tmin}	28,97
Наибольший технологический натяг	мкм	N_{Tmax}	102,65
Стандартная посадка	–	–	50,5H6/s6 или 50,5H7/s6

В результате расчета получены посадки, представленные в таблице 5, откуда видно, что более жесткие условия по точности получаются при расчете посадки для соединения, где обе детали изготавливают по 6-му качеству – $\varnothing 50,5 \frac{H6}{s6} \left(\begin{array}{c} +0,019 \\ +0,072 \\ +0,053 \end{array} \right)$. Также можно использовать посадку $\varnothing 50,5 \frac{H7}{s6} \left(\begin{array}{c} +0,030 \\ +0,072 \\ +0,053 \end{array} \right)$, что приведет к расширению поля допуска на обработку отверстия тонкостенной втулки и, следовательно, снизит себестоимость обработки втулки.

Небольшое нарушение границы наименьшего натяга в данном случае вполне допустимо, но при этом следует уменьшить силу резания при шлифовании втулки до 600 Н. Также можно не обрабатывать поверхность втулки, если она заранее будет изготовлена с заданной шероховатостью поверхности и радиальным биением в соответствии с требованиями к валам по ГОСТ 8752-79 «Манжеты резиновые армированные для валов. Технические условия».

На рисунке 6 показано реализованное на практике соединение тонкостенной втулки толщиной 0,75 мм с первичным валом коробки передач ЯМЗ-239.

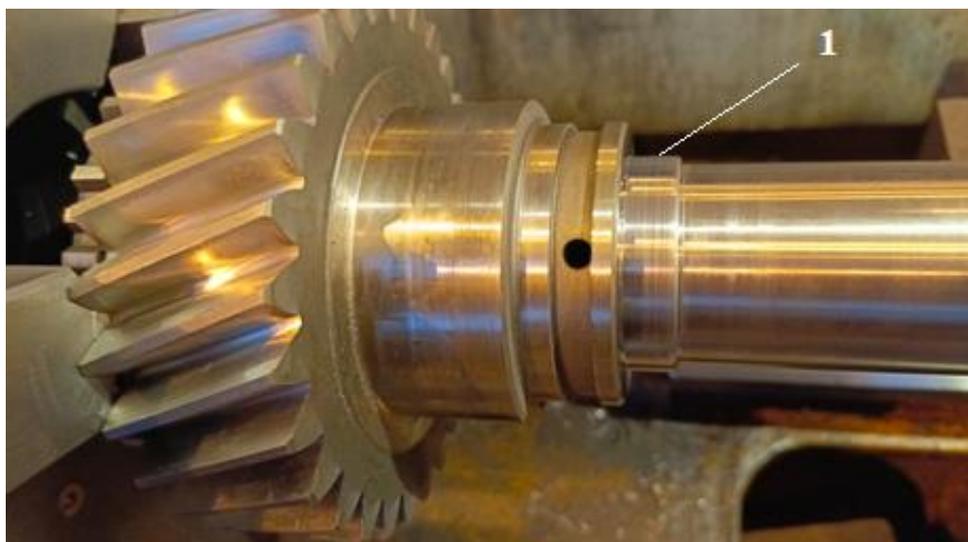


Рисунок 6 – Соединение тонкостенной втулки с первичным валом коробки передач ЯМЗ-239: 1 – установленная тонкостенная втулка

Таким образом, разработана методика расчета посадок с натягом, для восстановления поверхности вала под манжету методом запрессовки тонкостенных втулок. Данная методика позволяет определять технологические натяги для фиксации тонкостенных втулок на валу с целью отсутствия возможности проворачиваемости втулки относительно поверхности вала при эксплуатации уплотнительного соединения. Методика апробирована на соединении тонкостенной втулки с первичным валом коробки передач ЯМЗ-239. В результате расчетов определены размеры тонкостенной втулки, получен диапазон технологических натягов и выбраны посадки $\varnothing 50,5 \frac{H6}{s6} \left(\begin{array}{c} +0,019 \\ +0,072 \\ +0,053 \end{array} \right)$ и $\varnothing 50,5 \frac{H7}{s6} \left(\begin{array}{c} +0,030 \\ +0,072 \\ +0,053 \end{array} \right)$.

В пятой главе «Оценка экономической эффективности» произведен расчет экономической эффективности от внедрения технологического процесса восстановления вала обработкой под ремонтный размер и внедрения технологического процесса восстановления вала соединения «вал-уплотнение» методом запрессовки ремонтных втулок. В результате расчета получены данные, которые подтверждают техническую и экономическую эффективность работ в данном направлении.

Результаты трудоемкости и затрат на процесс обработки вала под ремонтный размер представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Себестоимость процесса обработки вала под ремонтный размер

Операция	Трудоемкость, чел.-ч	Затраты на заработную плату, руб.	Затраты на материалы, руб.	Себестоимость выполнения, руб.
Очистка вала	0,09045	476,22	319,07	795,29
Внешний осмотр	0,00243	12,79	8,57	21,37
Установка и снятие вала	0,00162	8,53	5,71	14,24
Проверка размера вала индикаторной скобой	0,001485	7,82	5,24	13,06
Механическая обработка (шлифование)	0,027	142,16	95,24	237,40
Полировка и доводка	0,06345	334,06	223,82	557,89
Сборка	0,003	15,80	10,58	26,38
Контроль	0,0018	9,48	6,35	15,83
Итого	0,191235	1006,85	674,59	1681,44

Себестоимость обработки вала под ремонтный размер составила 1681,44 руб. Стоимость нового вала – 8250 руб. В связи с этим обработка под ремонтный размер является экономически выгодным.

Исходные данные и результаты расчета экономического эффекта от внедрения технологического процесса представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты расчета экономического эффекта от внедрения технологического процесса обработки вала соединения «вал – уплотнение» под ремонтный размер

Показатели	Значение, тыс. руб.	
	Базовый год	Проектный год
Стоимостная оценка результатов с учетом фактора времени	8250	8250
Затраты по годам с учетом фактора времени	5633	1681
Экономический эффект	2617	6569

Единовременные затраты составили $K_t = 3952$ тыс. р. Они складываются из покупки и установки универсального круглошлифовального станка 3У132ВМ, комплекта оснастки, универсального токарно-винторезного станка модели 1К62. Для очистки валов используется имеющаяся на предприятии мощная машина ОМ–4267.

Экономический эффект от внедрения технологического процесса восстановления вала под манжету обработкой под ремонтный размер в базовом году составит 2617 тыс. рублей, а в проектном – 6569 тыс. рублей при программе ремонта 1000 ед. валов в год.

При реализации технологического процесса установки ремонтной втулки формируются следующие затраты. После обработки вала под заданные отклонения на вал монтируют ремонтную деталь – втулку с заданными размерами. Соединение производят путём установки с соответствующим натягом или нагревом втулки. Втулки приобретаются у проверенных поставщиков, так как себестоимость изготовления втулки на специализированном заводе значительно ниже. Стоимость приобретаемой втулки для формирования посадки $\varnothing 50,5H6/s6$ составляет 325 руб. Таким образом, стоимость ремонта вала составит 2001,44 руб. Стоимость нового вала – 8250 руб.

Исходные данные и результаты расчета экономического эффекта от внедрения технологического процесса представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты расчета экономического эффекта от внедрения технологического процесса восстановления вала соединения «вал – уплотнение» методом установки тонкостенной втулки

Показатели	Значение, тыс. руб.	
	Базовый год	Проектный год
Стоимостная оценка результатов с учетом фактора времени	8250	8250
Затраты по годам с учетом фактора времени	5958	2006
Экономический эффект	2292	6244

Экономический эффект от внедрения технологического процесса восстановления вала под манжету методом установки тонкостенной втулки в базовом году составит 2292 тыс. рублей, а в проектном – 6244 тыс. рублей при программе ремонта 1000 ед. валов в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика комплектования деталей соединений «вал-уплотнение», включающая в себя: расчет ремонтных размеров вала и их отклонений; расчет числа групп комплектования для валов и манжет; подбор манжет по критерию сохранения наименьшего натяга в соединении. На базе безмоментной теории оболочек получены математические выражения и разработана методика расчета натягов при восстановлении поверхности вала под манжету с помощью тонкостенных втулок. Данная методика позволяет определять наименьший натяг из условия требуемой фиксации втулки на валу и наибольший натяг из условия работы материала втулки только в зоне упругих деформаций.

2. Для соединения вала с манжетой первичного вала коробки передач ЯМЗ-239 $\varnothing 52$ мм при применении предлагаемой методики получено четыре ремонтных размера вала ($51,8_{-0,072}$, $51,7_{-0,072}$, $51,6_{-0,072}$, $51,5_{-0,072}$) и составлена комплектовочная таблица сборки валов с манжетами (соответственно $52_{-3,0}^{-2,2}$, $52_{-3,0}^{-2,3}$, $52_{-3,0}^{-2,4}$, $52_{-3,0}^{-2,5}$). В результате проведенного вероятностного анализа качества сборки соединений рекомендовано закупать на 15 % больше манжет с целью обеспечения сборки 100 % соединений. Для фланца коробки передач ЯМЗ-239 $\varnothing 100$ мм получено четыре ремонтных размера вала ($99,8_{-0,054}$, $99,7_{-0,054}$, $99,6_{-0,054}$, $99,5_{-0,054}$) и составлена комплектовочная таблица сборки валов с манжетами (соответственно $100_{-3,0}^{-2,2}$, $100_{-3,0}^{-2,3}$, $100_{-3,0}^{-2,4}$, $100_{-3,0}^{-2,5}$).

3. В результате апробации методики расчета посадок тонкостенных втулок с целью восстановления поверхности первичного вала коробки передач ЯМЗ-239 под манжету определены размеры тонкостенной втулки, получен

диапазон технологических натягов и выбраны посадки $\varnothing 50,5 \frac{H6}{s6} \left(\begin{array}{c} +0,019 \\ +0,072 \\ +0,053 \end{array} \right)$ и

$$\varnothing 50,5 \frac{H7}{s6} \left(\begin{array}{c} +0,030 \\ +0,072 \\ +0,053 \end{array} \right).$$

4. Экономический эффект от внедрения технологического процесса восстановления поверхности вала под манжету обработкой под ремонтный размер в базовом году составит 2617 тыс. руб., а в проектном – 6569 тыс. руб. при программе ремонта 1000 ед. валов в год. Экономический эффект от внедрения технологического процесса восстановления поверхности вала под манжету методом установки тонкостенной втулки в базовом году составит 2292 тыс. рублей, а в проектном – 6244 тыс. рублей при программе ремонта 1000 ед. валов в год.

Рекомендации производству

1. Для повышения долговечности соединений валов с резиновыми армированными манжетами необходимо при ремонте сборочной единицы не только заменять старые манжеты на новые, но и обязательно восстанавливать поверхность вала с требуемыми параметрами функциональной взаимозаменяемости – нормами точности по величинам требуемых натягов, шероховатости поверхности в пределах $R_a = 0,16 \dots 0,32$ мкм, а также радиального биения и отклонения от соосности манжеты относительно вала.

2. При первом ремонте соединения вала с манжетой рекомендуется использовать систему ремонтных размеров валов с подбором манжет с целью сохранения предельных натягов в соединении. В случае повторного ремонта следует применять тонкостенные ремонтные втулки с и последующей обработкой поверхности вала под номинальный размер с поверхностно – пластическим деформированием до шероховатости поверхности $R_a = 0,1 \dots 0,32$ мкм. Посадки втулок на вал следует определять по разработанной методике для каждого номинального размера.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Проведенные диссертационные исследования могут служить основой для дальнейшего развития и совершенствования методов функциональной взаимозаменяемости посадок резиновых армированных манжет на валы.

Перспективными направлениями развития темы являются:

1. Разработка методики и технологии использования полимерных втулок для восстановления поверхности вала под манжету;

2. Разработка методики и технологии применения еще более тонкостенных втулок, толщиной вплоть до 0,5 мм, в том числе и с целью временного устранения утечек без замены манжеты при отказе соединения во время полевых работ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Нестеркин, Г. А. Разработка методики подбора манжет для валов ремонтных размеров / Г. А. Нестеркин // Сельский механизатор. – 2023. – № 6. – С. 36-37.

2. Методика комплектования деталей соединений «вал-уплотнение» при ремонте / О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба, Ю. Г. Вергазова, Г. А. Нестеркин // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 70-75.

3. Расчет и выбор посадок с натягом для восстановления поверхности вала под манжету запрессовкой тонкостенных втулок / О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба, Ю. Г. Вергазова, Д.А. Пупкова, Г.А. Нестеркин // Вестник машиностроения. – 2023. – Т. 102, № 12. – С. 990-994.

Программа на ЭВМ

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024619708 Российская Федерация. «Расчет ремонтного размера вала под резиновую армированную манжету» : № 2024618294 : заявл. 16.04.2024 : опубл. 25.04.2024 / Г. А. Нестеркин, Л. А. Гринченко, О. А. Леонов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева».

Прочие издания:

- в изданиях, включенных в систему цитирования (библиографическую базу) Scopus

1. Development of a Sealing Cup Selection Procedure for YAMZ Transmission Flange Sealing during Repair / O. A. Leonov, N. Zh. Shkaruba, Yu. G. Vergazova, G. A. Nesterkin // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2024. – Vol. 53, No. 4. – P. 335-340. – DOI 10.1134/S1052618824700274.

- в изданиях, включенных в РИНЦ и материалах международных конференций

1. Нестеркин, Г. А. Классификация и применяемость уплотнительных устройств в сельскохозяйственной технике / Г. А. Нестеркин // Чтения академика В. Н. Болтинского : Сборник статей, Москва, 17–18 января 2024 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет, ООО «Сам Полиграфист», 2024. – С. 245-252.

2. 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.

3. Леонов, О. А. Оценка экономической эффективности обработки вала под ремонтный размер / О. А. Леонов, Г. Н. Темасова, Г. А. Нестеркин // Модернизация, Инновации, Прогресс (МИП-V-2023) : сборник научных статей по материалам V Международной научной конференции, Красноярск, 13–15 сентября 2023 года. – Красноярск: Общественное учреждение "Красноярский краевой Дом науки и техники Российского союза научных и инженерных общественных объединений", 2023. – С. 28-38.

4. Нестеркин, Г. А. Основные характеристики соединения "вал – уплотнение" сельскохозяйственной техники / Г. А. Нестеркин // Чтения академика В. Н. Болтинского, Москва, 25–26 января 2023 года. Том 2. – Москва: ООО «Сам полиграфист», 2023. – С. 318-323.