

**КИРСАНОВ Филипп Александрович**

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОСАДОЧНЫХ ОТВЕРСТИЙ В КОРПУСНЫХ  
ДЕТАЛЯХ ТРАНСМИССИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ  
ТЕХНИКИ ЭЛАСТОМЕРОМ Ф-40С**

Специальность 05.20.03 – Технологии и средства технического  
обслуживания в сельском хозяйстве

Автореферат  
диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Мичуринск – Наукоград РФ, 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Липецкий государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО ЛГТУ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Ли Роман Иннакентьевич

Официальные оппоненты: Юдин Владимир Михайлович  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Российский государственный аграрный заочный университет»/кафедра надежности и ремонта машин им. И. С. Левитского, заведующий

Жачкин Сергей Юрьевич  
доктор технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет»/кафедра автоматизированного оборудования машиностроительного производства, профессор

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I»

Защита диссертации состоится «21» мая 2015 года в 12 часов на заседании диссертационного совета ДМ 220.041.03 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Мичуринский государственный аграрный университет» по адресу: 393760, Тамбовская область, г. Мичуринск, ул. Интернациональная, 101, зал заседаний диссертационных советов, тел/факс: 8 (47545) 9-44-12, E-mail: [dissov@mail.ru](mailto:dissov@mail.ru)

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Мичуринский государственный аграрный университет» и на сайте [www.mgau.ru](http://www.mgau.ru), с авторефератом на сайте Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации [www.vak.ed.gov.ru](http://www.vak.ed.gov.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета ДМ 220.041.03,  
кандидат технических наук, доцент

Михеев Н. В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Цена корпусных деталей значительно превышает цену других типовых деталей и в значительной мере формирует цену агрегатов и машины в целом. Эти детали являются базисными деталями, которые в основном определяют ресурс всего агрегата.

Одной из основных причин выбраковки корпусных деталей является износ посадочных отверстий под подшипники. При износе посадочных отверстий в корпусных деталях агрегатов трансмиссии автотракторной техники изменяется первоначальное взаимное расположение валов с шестернями и подшипниками. Из-за перекоса внутреннего и наружного колец, в подшипнике существенно увеличивается нагрузка на тела и дорожки качения, что резко снижает его ресурс. При нарушении параллельности валов меняется межцентровое расстояние у шестерен, что приводит к повышению контактных напряжений на зубьях и существенному сокращению срока их службы.

Причиной износа посадочных отверстий в корпусных деталях является фреттинг-коррозия. Способы восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях полимерными материалами выгодно отличаются простотой, низкой себестоимостью, полностью исключают появление фреттинг-коррозии, значительно увеличивают ресурс подшипниковых узлов.

Химическая промышленность России постоянно выпускает новые перспективные полимерные материалы конструкционного и функционального назначения. Исследование таких материалов способствует разработке высокоэффективных технологических процессов восстановления, которые повысят послеремонтный ресурс корпусных деталей, надежность машин, сократят материальные расходы на ремонт сельскохозяйственной техники.

**Степень разработанности темы.** Восстановлению деталей автотракторной техники полимерными материалами посвящены труды Астанина В. К., Гаджиева А. А., Котина А. В., Кононенко А. С., Курчаткина В. В., Ли Р. И., Мельниченко И. М. и других отечественных ученых. Для восстановления корпусных деталей разработаны и успешно применяются технологии восстановления эпоксидными составами, анаэробными герметиками и композициями на их основе, эластомерами.

Наряду с достоинствами вышеуказанные материалы имеют индивидуальные недостатки, поэтому необходимы исследования новых перспективных полимерных материалов. ОАО "НИИ пластмасс им. Г. С. Петрова" выпускает новый эластомер лак Ф-40С. Представляют практический интерес всесторонние экспериментальные исследования потребительских свойств эластомера Ф-40С, для разработки технологии восстановления.

Вопрос калибрования отверстий с полимерным покрытием исследован не в полной мере и требует дальнейшего развития. Необходимо разработать способ, исключая влияние усадки полимерного материала при отверждении, что обеспечит повышение точности размера отверстий с полимерным покрытием.

Требует дальнейшего исследования вопрос определения оптимального натяга полимерной посадки «подшипник – корпус» при восстановлении корпус-

ных деталей. Необходимы исследования влияния натяга посадки и деформационно-прочностных свойств полимерного материала на радиальный зазор в подшипнике, который в значительной мере определяет его ресурс.

Работа выполнена на кафедре "Транспортные средства и техносферная безопасность" Липецкого государственного технического университета в соответствии с планом госбюджетных научно-исследовательских работ ЛГТУ на 2011...2015 годы по теме 05.02.01 «Разработка перспективных технологий восстановления и упрочнения деталей машин и технологического оборудования».

**Цель работы.** Повышение эффективности восстановления посадочных отверстий корпусных деталей сельскохозяйственной техники эластомером Ф-40С за счет повышения качества полимерных покрытий, обеспечения высокой долговечности восстановленных неподвижных соединений подшипников.

**Объект исследований.** Пленки и полимерные покрытия, подшипники качения, неподвижные соединения «корпус-подшипник», выполненные эластомером Ф-40С.

**Предмет исследования.** Деформационно-прочностные и адгезионные свойства эластомера Ф-40С, зависимости радиального и осевого зазоров в подшипнике от натяга посадки и температуры, усилия резания, повреждаемости и круглости покрытий от геометрических параметров калибра-резца, долговечность посадок «корпус-подшипник», выполненных эластомером Ф-40С.

**Методика исследования** представлена теоретическими исследованиями на основе теорий прочности, квалиметрии, обработки материалов резанием, экспериментальными исследованиями деформационно-прочностных и адгезионных свойств, механической обработки покрытий эластомера Ф-40С, долговечности посадок «корпус-подшипник», выполненных эластомером Ф-40С. Достоверность результатов исследования обусловлена применением современного исследовательского оборудования и приборов, методов регрессионного и дисперсионного анализа, результатами эксплуатационных испытаний.

**На защиту выносятся:**

– теоретические предпосылки повышения эффективности восстановления корпусных деталей эластомерами;

– способ восстановления полимерным покрытием изношенных корпусных деталей, исключая влияние усадки полимера на размер восстановленного отверстия, регрессионная модель удельной работы разрушения пленок эластомера Ф-40С, результаты исследований деформационно-прочностных и адгезионных свойств эластомера Ф-40С, зависимости радиального и осевого зазоров в подшипнике от натяга посадки и температуры, оптимальные геометрические параметры калибра-резца, результаты исследований повреждаемости и отклонений от круглости покрытий эластомера Ф-40С после обработки калибром-резцом, долговечности неподвижных соединений, восстановленных эластомером Ф-40С;

– технология и технологическая оснастка для восстановления посадочных отверстий под подшипники в корпусных деталях эластомером Ф-40С и технико-экономическая эффективность ее использования.

**Научная новизна диссертации** заключается в теоретическом обосновании зависимости рабочего радиального зазора в подшипнике с полимерным покрытием

ем от натяга посадки, деформационно-прочностных свойств полимерного материала и контактных деформаций между телами и дорожками качения колец подшипника, способе восстановления полимерным покрытием изношенных корпусных деталей, исключая влияние усадки полимера на размер восстановленного отверстия, регрессионной модели удельной работы разрушения пленок эластомера Ф-40С, исследовании деформационно-прочностных и адгезионных свойств эластомера Ф-40С, определении оптимальных геометрических параметров калибра-резца, исследовании повреждаемости и отклонений от круглости покрытий эластомера Ф-40С после обработки калибром-резцом, долговечности неподвижных соединений, восстановленных эластомером Ф-40С.

**Практическая ценность** заключается в разработанной технологии и технологической оснастке для восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях сельскохозяйственной техники эластомером Ф-40С.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на: научных конференциях профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов ЛГТУ (г. Липецк) в 2012...2015 гг.; Международных научно-практических конференциях ЛГТУ, (г. Липецк), в 2012, 2014 и 2015 гг.; Международных научно-производственных конференциях Бел.ГСХА (г. Белгород), в 2012 и 2013 гг.; Международной научно-практической конференции ОГАУ (г. Орел) в 2013 г.; Областной научно-практической конференции ЛГТУ (г. Липецк) в 2013 г.; Международной научно-практической конференции ФГБНУ ВНИИТиН (г. Тамбов) в 2013 г.; Международной научно-практической конференции МичГАУ (г. Мичуринск) в 2014 г.; заседании кафедры "Транспортные средства и техносферная безопасность" ЛГТУ в 2015 г.

**Публикации.** По результатам выполненной работы опубликовано – 18 печатных работ, в том числе три статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Общий объем публикаций составляет 7,5 п.л., автору принадлежит 3,9 п.л.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 178 страницах машинописного текста, содержит 64 рисунка, 8 таблиц, 4 приложения и библиографию из 118 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** изложены актуальность темы и основные положения, которые выносятся на защиту.

**В первой главе** «Анализ состояния вопроса, цель и задачи исследований» приведен анализ способов восстановления корпусных деталей, технологической оснастки для обеспечения точности размеров отверстий с полимерным покрытием в корпусных деталях, теоретических вопросов по определению оптимального натяга полимерного покрытия при восстановлении посадочных отверстий в корпусных деталях эластомерами.

Решению научных проблем технологии ремонта автотракторной техники и восстановления изношенных деталей посвящены труды Ачкасова К.

А., Астанина В. К., Батищева А. Н., Бугаева В. А., Голубева И. Г., Ерохина М. Н., Жачкина С. Ю., Курчаткина В. В., Казанцева С. П., Ли Р. И., Лялякина В. П., Пучина Е. А., Черноиванова В. И., Юдина В. М. и других отечественных ученых.

Корпусные детали восстанавливают установкой дополнительной детали, наплавкой, нанесением гальванических покрытий, напылением, электроконтактной приваркой стальной ленты и др. Эти способы восстановления имеют общие недостатки: сложность оборудования и процесса, энергоемкость, не обеспечивается фреттингостойкость восстановленных отверстий.

Способы восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях полимерными материалами выгодно отличаются простотой, низкой себестоимостью, полностью исключают появление фреттинг-коррозии, значительно увеличивают ресурс подшипниковых узлов.

Анализ показал, что, несмотря на достоинства адгезивов и композиций на их основе, основной технологической проблемой является сложность выбора технологических баз и центрирования склеиваемых деталей в корпусных деталях. Стеклообразное состояние эпоксидных смол определяет относительно низкий ресурс отверстий корпусных деталей, восстановленных эпоксидными составами. Этих недостатков лишены технологии восстановления эластомерами. ОАО "НИИ пластмасс им. Г. С. Петрова" выпускает новый эластомер Ф-40С. Необходимы всесторонние экспериментальные исследования потребительских свойств эластомера Ф-40С, для разработки технологии восстановления изношенных посадочных отверстий.

Известные способы калибрования отверстий с полимерным покрытием имеют общий недостаток – точность отверстий с полимерным покрытием значительно зависит от усадки материала при отверждении. Необходимо разработать способ и оснастку для восстановления изношенных посадочных отверстий в корпусных деталях полимерным материалом, исключая влияние усадки при отверждении и обеспечивающими повышение точности размера отверстий с полимерным покрытием, эффективность восстановления.

Анализ источников показал, что вопрос определения натяга полимерной посадки «корпус-подшипник» при восстановлении отверстий корпусных деталей исследован не в полной мере. Профессором Курчаткиным В. В. натяг посадки исследован в аспекте обеспечения неподвижности восстановленного соединения "корпус-подшипник с полимерным покрытием". Профессором Ли Р. И. натяг полимерного покрытия исследован в разрезе обеспечения упругого насыщенного контакта в соединении "корпус-подшипник с полимерным покрытием", что обеспечит наименьшую изнашиваемость соединения. Представляют интерес исследования влияния натяга посадки и деформационно-прочностных свойств полимерного материала на радиальный зазор в подшипнике, который в значительной мере определяет его ресурс.

Необходимо на основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработать технологию восстановления посадочных отверстий корпусных деталей эластомером Ф-40С.

**На основании проведенного анализа, в диссертационной работе сформулированы следующие задачи исследований:**

- исследовать вопрос влияния натяга посадки и деформационно-прочностных свойств полимерного материала на радиальный зазор в подшипнике;
- разработать способ восстановления изношенных посадочных отверстий в корпусных деталях полимерным покрытием, исключая влияние усадки полимерного материала на размер восстановленного отверстия;
- исследовать деформационно-прочностные и адгезионные свойства эластомера Ф-40С;
- исследовать зависимость радиального и осевого зазоров в подшипнике от натяга полимерного покрытия и температуры;
- определить экспериментально оптимальные геометрические параметры режущего клина калибра-резца и исследовать повреждаемость покрытий эластомера Ф-40С после обработки калибром-резцом;
- исследовать долговечность неподвижных соединений, восстановленных эластомером Ф-40С;
- разработать технологию восстановления посадочных отверстий корпусных деталей эластомером Ф-40С и оценить ее технико-экономическую эффективность.

**Во второй главе** «Теоретические предпосылки повышения эффективности восстановления корпусных деталей эластомерами» рассмотрены теоретические аспекты определения оптимального натяга посадки «подшипник-корпус» при восстановлении отверстий в корпусных деталях полимерным покрытием, обеспечивающего рабочий радиальный зазор в подшипнике, разработаны способ и технологическая оснастка для восстановления изношенных посадочных отверстий, обеспечивающие повышение точности размеров отверстий с полимерным покрытием.

**Теоретические аспекты определения оптимального натяга посадки «подшипник-корпус» при восстановлении посадочных отверстий в корпусных деталях эластомерами.**

**Деформация наружного кольца подшипника от натяга посадки.** В работе Ли Р. И. полимерное покрытие после запрессовки подшипника в отверстие корпусной детали рассматривают как цилиндрическую оболочку, которая за счет натяга посадки  $N$  осесимметрично нагружена радиальным давлением  $P$  (рисунок 1).

Прогиб цилиндрической оболочки  $\omega$  определяют по формуле

$$\omega = PR^{*2}/E_{\text{пн}}h_{\text{пн}}, \quad (1)$$

где  $R^*$  – радиус срединной поверхности цилиндрической оболочки (полимерного покрытия);  $E_{\text{пн}}$  – модуль упругости полимерного материала;  $h_{\text{пн}}$  – толщина полимерного покрытия.

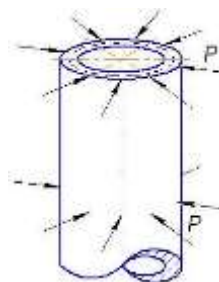


Рисунок 1 – Осесимметричное нагружение цилиндрической оболочки

Примем прогиб цилиндрической оболочки равным натягу  $\omega = N$ , тогда давление  $P$  можно определить по формуле

$$P = cE_{nm}Nh_{nn} / R^{*2}, \quad (2)$$

где  $c$  – поправочный коэффициент, для покрытий эластомера Ф-40С коэффициент  $c = 100$ .

Представим наружное кольцо подшипника качения как цилиндр подвергаемый сжатию. Напряженное состояние полимерного покрытия создает осесимметричное равномерное давление  $P$  на наружное кольцо подшипника, сжимая его. Имеем задачу Ляме о сжатии цилиндра равномерным давлением. Напряжения и перемещения можно определить по известным формулам

$$\sigma_{rnn} = 0, \quad \sigma_{\theta nk} = -\frac{2}{1-K^2}P, \quad u = -\frac{r}{E} \frac{2}{1-K^2}P, \quad (3)$$

где  $\sigma_{rnn}$  и  $\sigma_{\theta nk}$  – радиальное и окружное напряжение в цилиндре;  $u$  – перемещение (на сторону) наружной поверхности цилиндра при сжатии;  $r$  – внутренний радиус цилиндра;  $K$  – отношение внутреннего радиуса к наружному радиусу цилиндра.

Приравняем давление от натяга посадки  $N$  к давлению  $P$  на цилиндр. Подставив выражение (2) в формулу (3) получили зависимость деформации наружного кольца подшипника от натяга полимерного покрытия

$$u = -\frac{(3D+d)}{4ER^{*2}} \times \frac{cE_{nm}Nh_{nn}}{1 - \left[0,25\left(3 + \frac{d}{D}\right)\right]^2}, \quad (4)$$

где  $D$  и  $d$  – наружный и внутренний диаметры подшипника

**Рабочий радиальный зазор в работающем подшипнике с полимерным покрытием.** Рабочий радиальный зазор в работающем подшипнике определяют по формуле

$$e_p = e_n - \delta_2 - K_t + \delta_o, \quad (5)$$

где  $e_n$  – начальный радиальный зазор;  $\delta_2$  – уменьшение зазора из-за увеличения дорожки качения внутреннего кольца подшипника при установке с натягом на вал;  $K_t$  – уменьшение зазора от разности температур в подшипнике,  $\delta_o$  – увеличение посадочного зазора из-за наличия контактных деформаций между телами и дорожками качения внутреннего и наружного колец подшипника.

$$K_t = \alpha d_0 \Delta t, \quad (6)$$

где  $\alpha$  – коэффициент линейного температурного расширения;  $d_0$  – приведенный диаметр дорожки качения внутреннего кольца, мм;  $\Delta t$  – разность температур колец подшипника, °С;



Уменьшение зазора из-за увеличения дорожки качения внутреннего кольца подшипника при его установке с натягом на вал рассчитывают по формуле

$$\delta_2 = \frac{4d\Delta}{D+3d}, \quad (7)$$

где  $\Delta$  – натяг посадки подшипника на вал.

Выражение (6) получит вид

$$K_t = \frac{\alpha(D+3d)\Delta t}{4} \quad (8)$$

С учетом формулы (4) формула (5) получит вид

$$e_p = e_n - \delta_2 - u - K_t + \delta_o, \quad (9)$$

Увеличение посадочного зазора из-за наличия контактных деформаций между телами и дорожками качения внутреннего колец подшипника

$$\delta_o = \delta_e + \delta_n = \frac{n_{\delta_e}}{2} \sqrt[3]{\frac{9}{4} \eta^2 P^2 \sum k_e} + \frac{n_{\delta_n}}{2} \sqrt[3]{\frac{9}{4} \eta^2 P^2 \sum k_n}, \quad (10)$$

где  $\delta_e$  – контактная деформация между телами и дорожкой качения внутреннего кольца подшипника;  $\delta_n$  – контактная деформация между телами и дорожкой качения наружного кольца подшипника;  $n_{\delta_e}$  и  $n_{\delta_n}$  – коэффициенты, которые выбирают из таблицы по значениям вспомогательных аргументов  $\theta_e$  и  $\theta_n$  для внутреннего и наружного колец;  $\sum k_e$  и  $\sum k_n$  – суммы главных кривизн контактирующих тел с внутренним и наружным кольцами подшипника.

Вспомогательный аргумент  $\theta$  зависит от главных радиусов кривизны контактирующих тел

$$\theta = \frac{k_{11} - k_{12} + k_{21} - k_{22}}{\sum k}, \quad k_{11} = \frac{1}{R_{11}}; k_{12} = \frac{1}{R_{12}}; k_{21} = \frac{1}{R_{21}}; k_{22} = \frac{1}{R_{22}},$$

где  $R_{11}$  и  $R_{12}$  – главные радиусы кривизны первого тела в точке начального касания, определенные в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, линия пересечения которых совпадает с линией действия нормальной нагрузки;  $R_{21}$  и  $R_{22}$  – главные радиусы кривизны второго тела.

Сумму главных кривизн контактирующих тел определяют по формуле

$$\sum k = k_{11} + k_{12} + k_{21} + k_{22}$$

Проведем анализ параметров контакта в подшипнике с полимерным покрытием, а именно главных радиусов кривизн шарика и желоба внутреннего (наружного) кольца подшипника в точке начального касания, определенных в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

*Для шарика, контактирующего с желобом внутреннего кольца подшипника*

Так как шарик имеет с дорожкой качения внутреннего кольца подшипника традиционный контактную деформацию  $\delta_e$  определим по формуле

$$\delta_e = \frac{n_{\delta_e}}{2} \sqrt[3]{\frac{9}{4} \eta^2 P^2 \sum k_e} = \frac{n_{\delta_e}}{2} \sqrt[3]{2,25 \eta^2 P^2 \left( \frac{5,9417}{D_w} + \frac{2}{\frac{D_0}{\cos \alpha} - D_w} \right)}, \quad (11)$$

где  $D_w$  – диаметр шарика;  $D_0$  – средний диаметр подшипника,  $D_0 = (D+d)/2$ ;  $\alpha$  – угол контакта.

Для шарика, контактирующего с желобом наружного кольца подшипника

Благодаря наличию полимерного покрытия в сопряжении "корпус- подшипник", наружное кольцо подшипника деформируется в эллипс с большой осью, совпадающей по направлению с радиальной нагрузкой. Радиус кривизны желоба наружного кольца подшипника в продольной плоскости следует рассчитывать по формуле

$$R_{21n} = 0,5 \left( \frac{D_0}{\cos \alpha} + D_w \right) + u_0, \quad (12)$$

где  $u_0$  – деформация наружного кольца напротив центрального тела качения.

Деформацию наружного кольца подшипника напротив центрального  $u_0$  тела качения определяют по формуле

$$u_0 = -\frac{1}{8EJ\beta^3} \left( P_0 + 2P_1 e^{-\beta l_1} (\sin \beta l_1 + \cos \beta l_1) + 2P_2 e^{-2\beta l_1} (\sin 2\beta l_1 + \cos 2\beta l_1) \right),$$

где  $E$  – модуль упругости материала подшипника;  $J$  – момент инерции поперечного сечения наружного кольца подшипника;  $l_1$  – расстояние между точками приложения нагрузок на центральное, первые и вторые боковые тела качения;  $P_0, P_1, P_2$  – нагрузка на центральное, первое и второе тела качения, соответственно;  $\beta$  – коэффициент,  $\beta = \sqrt[4]{k/4EJ}$ , где  $k$  – погонный коэффициент постели между реакцией в каждой точке кольца и прогибом.

Радиус кривизны желоба наружного кольца подшипника в поперечной плоскости в стандартном подшипнике  $R_{жвк} \approx 0,515D_w$ . Из-за наличия полимерной подложки, наружное кольцо при радиальном нагружении деформируется и поверхность желоба в сравнении со стандартным подшипником в большей степени охватывает поверхность шарика. То есть радиус желоба уменьшается, однако его значение не может быть менее  $0,5D_w$ . Поэтому принимаем  $R_{жвк} = 0,5D_w$ . В результате получим

$$R_{22n} = f_{жвк} D_w = 0,5D_w \quad (13)$$

Получим формулу для расчета контактной деформации между телами и дорожками качения наружного кольца подшипника  $\delta_n$ .

$$\delta_n = \frac{n_{\delta n}}{2} \sqrt[3]{\frac{9}{4} \eta^2 P^2 \sum k_n},$$

$$\sum k = \frac{2}{D_w} + \frac{2}{D_w} + \frac{1}{0,5 \left( \frac{D_0}{\cos \alpha} + D_w \right) + u_0} + \frac{2}{D_w} = \frac{6}{D_w} + \frac{2}{\left( \frac{D_0}{\cos \beta} + D_w \right) + u_0},$$

$$\delta_n = \frac{n_{\delta n}}{2} \sqrt[3]{\frac{9}{4} \eta^2 P^2 \sum k_n} = \frac{n_{\delta n}}{2} \sqrt[3]{2,25 \eta^2 P^2 \left( \frac{6}{D_w} + \frac{2}{\frac{D_0}{\cos \alpha} + D_w + u_0} \right)} \quad (14)$$

Окончательно формула для расчета контактных деформаций между телами и дорожками качения внутреннего и наружного колец подшипника  $\delta_o$  примет вид

$$\delta_o = \frac{n_{\delta o}}{2} \sqrt[3]{2,25 \eta^2 P^2 \left( \frac{5,9417}{D_w} + \frac{2}{\frac{D_0}{\cos \alpha} - D_w} \right)} + \frac{n_{\delta n}}{2} \sqrt[3]{2,25 \eta^2 P^2 \left( \frac{6}{D_w} + \frac{2}{\frac{D_0}{\cos \alpha} + D_w + u_0} \right)}$$

$$\delta_o = (1,5\eta P)^{2/3} \left[ \frac{n_{\delta o}}{2} \sqrt[3]{\left(\frac{5,9417}{D_w} + \frac{2}{\frac{D_0}{\cos \alpha} - D_w}\right)} + \frac{n_{\delta i}}{2} \sqrt[3]{\left(\frac{6}{D_w} + \frac{2}{\frac{D_0}{\cos \alpha} + D_w + u_0}\right)} \right] \quad (15)$$

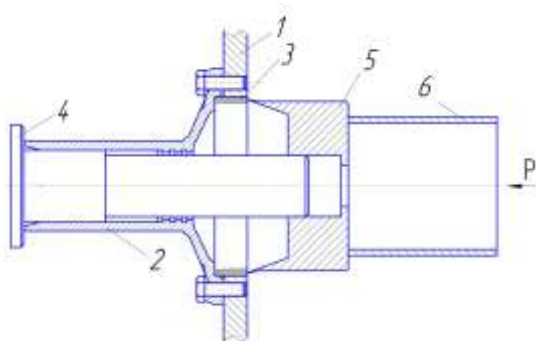
После подстановки в формулу (9) выражений (4), (7), (8) и (15) получили формулу для расчета рабочего радиального зазора в работающем подшипнике с полимерным покрытием

$$e_p = e_n - \frac{4d\Delta}{D+3d} - \frac{(3D+d)}{4ER^{*2}} \times \frac{cE_{nm}Nh_{nn}}{1 - \left[0,25\left(3 + \frac{d}{D}\right)\right]^2} - \frac{\alpha(D+3d)\Delta t}{4} +$$

$$+ (1,5\eta P)^{2/3} \left[ \frac{n_{\delta o}}{2} \sqrt[3]{\left(\frac{5,9417}{D_w} + \frac{2}{\frac{D_0}{\cos \alpha} - D_w}\right)} + \frac{n_{\delta i}}{2} \sqrt[3]{\left(\frac{6}{D_w} + \frac{2}{\frac{D_0}{\cos \alpha} + D_w + u_0}\right)} \right] \quad (16)$$

**Способ восстановления изношенных посадочных отверстий в корпусных деталях полимерным покрытием из эластомера Ф-40С.** Разработан способ восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях полимерным покрытием, который включает: подготовку поверхности отверстий, нанесение полимерного покрытия, его термическую обработку до полного отверждения и последующее калибрование под заданный размер и форму.

Центрирование оси калибра относительно отверстия выполняют по его не изношенной поверхности. Если изношена вся поверхность посадочного отверстия, используют технологическую базу присоединяемой детали. Устанавливают крышку подшипника, которую крепят болтами в резьбовых отверстиях корпусной детали отверстия (рисунок 2).



1 – корпусная деталь; 2 – крышка подшипника;  
3 – полимерное покрытие; 4 – базисная деталь; 5 – калибр; 6 – монтажная труба

Рисунок 2 – Схема калибрования отверстия с полимерным покрытием в корпусной детали

Центрирование калибра выполняют по не изношенной поверхности крышки подшипника, сопрягаемой с зазором с валом, который опирается на подшипник. При калибровании базисную деталь вставляют в отверстие корпусной детали до упора в ее торец, после чего корпусную деталь поворачивают, чтобы базисная деталь приняла вертикальное положение. Затем калибр одевают на хвостовик базисной детали с другой стороны отверстия. На калибр устанавливают торцом монтажную трубу и ударами молотка по ее противоположному торцу перемещают калибр вдоль отверстия с полимерным покрытием до тех пор, пока торец хвостовика не упрется в торцевую стенку калибра. При перемещении калибра его режущей кромкой срезаются излишки полимерного материала и обеспечива-

ется заданный размер и форма отверстия с полимерным покрытием. Для снижения трудоемкости способа и повышения производительности труда для перемещения калибра рекомендуется использование прессового оборудования.

### **Разработка технологической оснастки для калибрования полимерных покрытий.**

**Идентификация способа калибрования отверстий с полимерным покрытием и обоснование геометрических параметров калибра.** Полимерное покрытие, подвергаемое механической обработке, имеет прямолинейные образующие. Калибр, который фактически является резцом, движется параллельно обрабатываемой поверхности, заглубляясь в нее на заданную величину. Эти признаки позволяют идентифицировать наш способ механической обработки полимерного покрытия как строгание. Поэтому для обоснования геометрических характеристик калибра-резца использовали теорию резания полимеров и рекомендуемые технической литературой геометрические характеристики строгальных резцов.

Лак Ф-40С является эластомером, поэтому при правильном выборе геометрических характеристик резца (калибра) получим непрерывную сливную стружку и соответственно высокое качество обработки полимерного покрытия. Калибрование допускается в ручную или с использованием гидравлического пресса. Скорость резания при этом очень незначительна (не более 0,01 м/с), излишки полимерного покрытия удаляются за один проход, поэтому повышением температуры в зоне резания можно пренебречь.

Любой материал имеет критический передний угол резца, при котором радиальная составляющая силы резания  $P_y$  равна нулю. При обработке с таким углом получают наилучшую точность размеров и шероховатость обработанных поверхностей. Поэтому для обеспечения наилучшей точности размеров и шероховатости полимерных покрытий при калибровании необходимо экспериментально определить значение критического переднего угла режущего клина калибра-резца.

При строгании металлов в период врезания резца в обрабатываемый материал возникает удар, что исключает использование хрупких инструментальных материалов. Используют резцы с изогнутой головкой, т.к. в прямом резце под действием сил резания головка отклоняется назад по радиусу, вследствие чего вершина резца врезается со стороны задней поверхности в обработанную поверхность. Влиянием ударной нагрузки при внедрении режущего лезвия в упругий эластомер можно пренебречь в виду ее незначительности. В нашем случае главное режущее лезвие имеет форму окружности. Режущая кромка плавно переходит в цилиндрическую форму корпуса калибра. Конструктивные особенности калибра исключают деформацию, описанную выше.

С увеличением переднего угла силы резания уменьшаются, поэтому выбрали предварительно значения переднего угла режущего лезвия  $\gamma = 50; 60$  и  $70^\circ$ . Предельное значение переднего угла составляет  $70^\circ$ , так как при значениях  $\gamma > 70^\circ$  снижается прочность режущего лезвия. Так как калибрование полимерного покрытия выполняется за один проход, поэтому рассмотрели геометрические параметры чистового строгального резца. Для чистовых строгальных широких резцов значение главный угол в плане  $\phi = 0$ . Задний угол  $\alpha$  строгальных резцов со-

ставляет 6... 14°. Для калибра-резца приняли задний угол  $\alpha = 10^\circ$ , так как данный угол уменьшает воздействие упругого восстановления материала после прохождения формующего ножа.

В итоге выбраны предварительные геометрические параметры калибра-резца: передний угол  $\gamma = 50; 60$  и  $70^\circ$ , задний угол  $\alpha = 10^\circ$ , главный угол в плане  $\varphi = 0$ .

**Методика расчета точностных характеристик деталей устройства для калибрования отверстий с полимерным покрытием.** В работе рассмотрен корпус коробки передач. В качестве исходного звена приняли значение зазора между посадочным отверстием в корпусе коробки передач и наружным кольцом подшипника. Составлена размерная цепь (рисунок 3) и обозначены составляющие звенья по часовой стрелке, начиная с исходного звена  $A_\Delta$ .

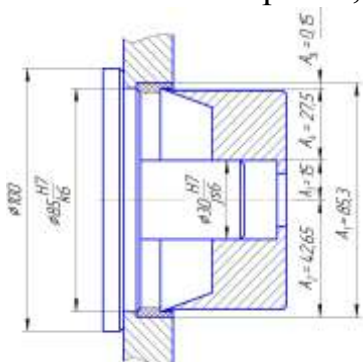


Рисунок 3 – Сборочная размерная цепь

Проверили правильность определения номинальных размеров по основному уравнению размерной цепи

$$\sum A_{\text{изв}} - \sum A_{\text{изм}} - \sum A_\Delta = 0; 85,3 - (42,65 + 15 + 27,5) - 0,15 = 0 \quad (17)$$

Задаём предельные размеры исходного звена. Величина зазора определяется номинальными размерами звеньев сборочной размерной цепи, условиями резания эластомера Ф-40С (температура обработки полимерного материала, передний угол калибра-резца, его соосность с отверстием и т.п.) и требуемой точностью изготовления сборочной единицы. Примем:  $A_{\Delta \min} = 0,1 \text{ мм}$ ,  $A_{\Delta \max} = 0,15 \text{ мм}$ .

Тогда допуск исходного звена равен:  $T_\Sigma = A_{\Delta \max} - A_{\Delta \min} = 150 - 100 = 50 \text{ мкм}$ .

Расчет размерной цепи вели вероятностным методом расчета и методом максимума – минимума. Анализ проведенных расчетов показал, что расчет размерной цепи методом максимума-минимума, способом одного качества обеспечивает минимальные отклонения отверстия с полимерным покрытием от заданного размера. Поэтому для расчета точностных характеристик деталей устройства для калибрования отверстий с полимерным покрытием рекомендуется этот метод.

**В третьей главе «Методика экспериментальных исследований»** приведены общая методика исследований и частные методики исследования деформационно-прочностных свойств пленок, адгезии, усилия резания, повреждаемости покрытий эластомера Ф-40С, радиального и осевого зазоров в подшипнике, долговечности неподвижных соединений «корпус-подшипник», восстановленных эластомером Ф-40С.

Деформационно-прочностные свойства пленок эластомера Ф-40С исследовали в соответствии с ГОСТ 14236-81, ГОСТ 9550-81 и ГОСТ 12423-66. Испыта-

ния образцов осуществляли на разрывной машине ИР 5047-50 с одновременной записью диаграммы "нагрузка-деформация".

Для получения оптимального режима термической обработки пленок эластомера Ф-40С проведен активный эксперимент по композиционному плану В<sub>2</sub>. В качестве функции отклика Y приняли удельную работу разрушения У, МДж/м<sup>3</sup> пленок, а независимыми факторами: X<sub>1</sub> и X<sub>2</sub> – время и температуру обработки.

Адгезию материала оценивали прочностью связи с металлом при отслаивании образцов (ГОСТ 21981-76). Образцами служили пластины 100×25×3 мм из стали 45, с шероховатостью поверхности Ra 0,63, на которые кистью №3 наносили послойно покрытие. Затем накладывали железную сетку №07 (ГОСТ 3826-82). На сетку послойно наносили эластомер Ф-40С.

При исследовании усилия резания образцами использовали втулки с покрытием толщиной 0,16 мм из эластомера Ф-40С на внутренней поверхности. Втулки изготовили из стали 45. Шероховатость посадочной поверхности Ra 1,25. Термическую обработку образцов выполняли в сушильном шкафу СНОЛ-3.5,3.5,3.5/3 при температуре 180°С в течение 3 ч. Для резания покрытия эластомера Ф-40С изготовили калибры-резцы из стали 45 с передним углом 50, 60 и 70°, задним углом 10°. Испытания образцов проводили на автоматизированном лабораторном комплексе ДМ-СН-3ЛР-0,12 с одновременной записью диаграммы "нагрузка-перемещение". Повреждаемость покрытий после калибрования оценивали по ГОСТ 9.407-84.

Исследования радиального и осевого зазоров в подшипнике проводили на образцах, представляющих втулки из стали 45, имитирующие корпус и запрессованные в них подшипники 209 с покрытием из эластомера Ф-40С. Натяг полимерной посадки: 0,03; 0,06 и 0,09 мм. Радиальный и осевой зазор измеряли в специальном приспособлении оригинальной конструкции, оснащенным электронной измерительной головкой ИЧЦ 0-10-0,001.

Исследование долговечности неподвижных соединений «корпус-подшипник 209», восстановленных эластомером Ф-40С проводили на вибростенде. Циклическая радиальная нагрузка составляла 20,0 кН. 1 ч работы стенда соответствует  $1,8 \times 10^5$  циклов нагружения. За критерий долговечности соединений приняли наработку до начала сдвига наружного кольца подшипника в посадочном отверстии.

**В четвертой главе** «Результаты экспериментальных исследований и их анализ» приведены результаты исследования деформационно-прочностных и адгезионных свойств эластомера Ф-40С, зависимости радиального и осевого зазоров в подшипнике от натяга полимерного покрытия и температуры, определения оптимальных геометрических параметров калибра-резца, исследования повреждаемости и отклонений от круглости покрытий эластомера Ф-40С после обработки калибром-резцом, долговечности неподвижных соединений, восстановленных эластомером Ф-40С.

**Исследование влияния температуры и времени отверждения на деформационно-прочностные свойства пленок эластомера Ф-40С.** Пленки эластомера Ф-40С имеют максимальную прочность при температуре термической обработки  $T = 180^\circ\text{C}$  и времени  $t = 3$  ч. Максимальную деформацию 80,5% имеют

пленки, отвержденные при  $T = 180^\circ\text{C}$  и времени  $t = 2$  ч, что в 1,05 и 1,22 раза превышает деформацию пленок, обработанных при температурах 160 и  $200^\circ\text{C}$ , соответственно. Зависимость удельной работы разрушения пленок от времени и температуры обработки является нелинейной. Определены интервалы варьирования факторов в последующем активном эксперименте.

**Исследование и оптимизация режима термической обработки пленок эластомера Ф-40С.** В результате реализации активного эксперимента получена регрессионная модель, представленная на рисунке 4.

Уравнение регрессии в натуральных единицах имеет вид

$$Y = -398,4149 + 32,6583X_1 + 4,2581X_2 - 0,0108X_1X_2 - 5,27X_1^2 - 0,0119X_2^2 \quad (18)$$

На основе анализа двумерного сечения определена область оптимума критерия оптимизации и выбран оптимальный режим термической обработки: температура  $T = 180^\circ\text{C}$ , время  $t = 3$  ч при котором пленки эластомера Ф-40С имеют максимальное значение удельной работы разрушения  $y_s = 27,2$  МДж/м<sup>3</sup>.

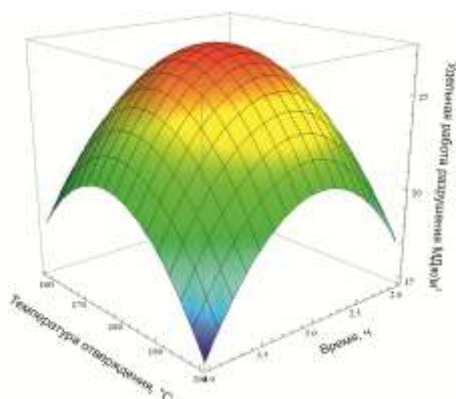


Рисунок 4 – Зависимость удельной работы разрушения пленок эластомера Ф-40С от температуры и времени отверждения

**Исследование модуля упругости эластомера Ф-40 и его модификации Ф-40С.** Модуль упругости при растяжении эластомера Ф-40С ( $E = 1040$  МПа) превышает в 1,2 раза модуль упругости эластомера Ф-40 ( $E = 870$  МПа). Значения модуля упругости при сжатии эластомера Ф-40С зависят от деформации и толщины покрытия материала. При толщине покрытия 0,13 мм с увеличением деформации сжатия от 20 до 80% модуль упругости увеличивается в 4 раза, от 300 до 1200 МПа. С увеличением толщины покрытия эластомера Ф-40С модуль упругости уменьшается. По аналогии с коэффициентом Кирхгофа проявляется масштабный фактор. При толщине покрытия 0,19 мм и деформации 20% модуль упругости, по сравнению с толщиной 0,13 и 0,16 мм, уменьшился в 3 и 2 раза и составил 100 МПа. С увеличением деформации до 80% модуль упругости повышается до 830 МПа, что по сравнению с толщиной 0,13 и 0,16 мм, меньше в 1,43 и 1,2 раза.

**Исследование адгезии эластомера Ф-40 и его модификации Ф-40С.** Адгезионная прочность эластомера Ф-40С составляет 10,8 кН/м, а эластомера Ф-40 – 3,2 кН/м. Адгезия эластомера Ф-40С в 3,38 раза превышает показатель эластомера Ф-40.

**Исследование зависимости радиального и осевого зазоров от натяга полимерной посадки и температуры нагрева подшипника 209 после запрессовки в корпусную деталь.** При натяге посадки эластомера Ф-40С в 30 мкм радиальный зазор в подшипнике составил 20 мкм. С увеличением натяга до 60 мкм за-

зор в подшипнике уменьшился до 17 мкм, т.е. в 1,18 раза. При натяге 90 мкм зазор в подшипнике уменьшился до 13 мкм, т.е. в 1,54 раза. Причина – напряженное состояние полимерного покрытия эластомера Ф-40С создает осесимметричное равномерное давление на наружное кольцо подшипника, сжимая его. Максимальное различие расчетных и экспериментальных значений радиального зазора в 7,1% отмечалось при натяге полимерной посадки 90 мкм, что позволяет сделать вывод: формула (16) обеспечивает достаточно высокую точность расчета.

Радиальный зазор подшипника после запрессовки в корпусную деталь с натягом посадки из эластомера Ф-40С в 30 мкм, при температуре 71,4°С, составляет 18 мкм. При температуре 83,2°С зазор подшипника уменьшился в 1,63 раза и составил 11 мкм. При температуре подшипникового узла 105,7°С зазор уменьшился по сравнению с зазором при температуре 71,4°С в 9 раз и составил 2 мкм. Увеличение натяга посадки до 60 мкм вызывает резкое уменьшение радиального зазора в подшипнике 209. При температуре 71,4°С зазор составил 2 мкм, а при температуре 83,2°С – 0 мкм. Дальнейшее повышение температуры подшипника привело к заклиниванию его тел качения.

Осевой зазор подшипника после запрессовки в корпусную деталь с натягом посадки из эластомера Ф-40С в 30 мкм составляет 152 мкм. При температуре 71,4°С он уменьшился до 105 мкм, т.е. в 1,45 раза. При температуры 83,2°С зазор в подшипнике уменьшился по сравнению с исходным в 1,77 раза и составил 86 мкм. Зазор был выбран до нуля при температуре 105,7°С. Дальнейшее увеличение температуры привело к заклиниванию тел качения в подшипнике.

**Исследование зависимости усилия резания эластомера Ф-40С от переднего угла режущего клина калибра-резца.** На рисунке 5 показана зависимость усилия резания  $F$  эластомера Ф-40С от переднего угла калибра-резца  $\gamma$ . Усилие резания  $F$  уменьшается с увеличением угла  $\gamma$  калибра-резца. Зависимость имеет линейный характер. При значении  $\gamma = 50^\circ$  усилие резания максимальное  $F = 0,997$  кН. С увеличением угла  $\gamma$  до  $60^\circ$  усилие резания уменьшилось в 1,26 раза и составило  $F = 0,792$  кН. Минимальное значение усилия резания  $F = 0,346$  кН имеет место при переднем угле  $\gamma = 70^\circ$ . Усилие резания при этом угле, по сравнению с усилием резания при значении угла  $\gamma = 50^\circ$ , уменьшилось в 2,88 раза.

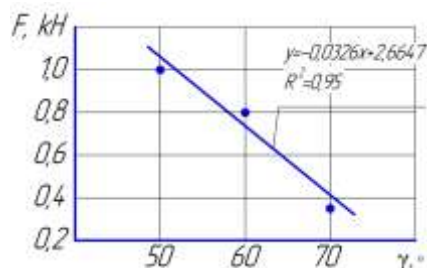


Рисунок 5 – Зависимость усилия резания  $F$  эластомера Ф-40С от переднего угла калибра-резца  $\gamma$ :

**Исследование повреждаемости покрытий эластомера Ф-40С после обработки калибром-резцом.** Площадь разрушенного покрытия эластомера Ф-40С после механической обработки калибром-резцом с передним углом  $\gamma = 50^\circ$  составила 10,5 %. После обработки калибром-резцом с углом  $\gamma = 60^\circ$  этот показатель уменьшился в 1,2 раза и составил 8,74 %. Площадь разрушенного покрытия эла-



стомера Ф-40С после обработки калибром-резцом с углом  $\gamma = 70^\circ$  по сравнению с углами  $\gamma = 50$  и  $60^\circ$  уменьшилась в 2,5 и 2,08 раза и составила 4,2 %.

Отклонение от круглости покрытия эластомера Ф-40С после обработки калибром-резцом с углом  $\gamma = 50^\circ$  составило 12 мкм. После обработки калибром-резцом с углом  $\gamma = 60^\circ$  этот показатель уменьшился в 1,71 раза и составил 7 мкм. Отклонение от круглости покрытия эластомера Ф-40С после обработки калибром-резцом с углом  $\gamma = 70^\circ$  по сравнению с углами  $\gamma = 50$  и  $60^\circ$  уменьшилось в 4 и 2,33 раза и составило 3 мкм.

**Исследование долговечности посадочных отверстий подшипников, восстановленных эластомером Ф-40С.** При толщине полимерного покрытия 0,20 мм ресурс восстановленных неподвижных соединений минимальный. Через 10 ч стендовых испытаний наружное кольцо подшипника провернулось в посадочном отверстии. В соединения с толщиной полимерного покрытия 0,15 мм долговечность многократно повысилась и составила 45 ч, что превышает долговечность соединений с толщиной полимерного покрытия  $h = 0,2$  мм в 4,5 раза, а с  $h = 0,175$  мм в 2,5 раза. При толщине полимерного покрытия 0,125 мм соединение оставалось работоспособным 222 ч. Этот показатель превышает долговечность соединений с толщиной полимерного покрытия  $h = 0,2$  мм в 22,2 раза, с  $h = 0,175$  мм в 12,3 раза, с  $h = 0,15$  мм в 4,93 раза.

Соединение, при толщине полимерного покрытия 0,1 мм, оставалось работоспособным до конца испытаний 330 ч. Поэтому допустимая толщина полимерного покрытия из эластомера Ф-40С, которая обеспечивает безотказную работу восстановленного соединения при циклической радиальной нагрузке 20 кН составляет 0,1 мм.

**В пятой главе** «Реализация результатов исследований и их технико-экономическая оценка» приведены разработанная технология восстановления подшипниковых отверстий корпусных деталей эластомером Ф-40С. Технология восстановления содержит следующие операции: очистка посадочных отверстий; измерение посадочных отверстий для определения износа; обезжиривание посадочных отверстий; нанесение эластомера Ф-40С на посадочные отверстия в корпусной детали; термическая обработка нанесенных полимерных покрытий; калибрование покрытия эластомера Ф-40С по заданный размер и форму; контроль качества полимерных покрытий в корпусной детали.

Технология восстановления подшипниковых отверстий корпусных деталей эластомером Ф-40С внедрена в ЗАО «Агрофирма имени «15 лет Октября» Лебедянского района, Липецкой области. Для оценки надежности восстановленных корпусных деталей с февраля 2013 г. по ноябрь 2014 г. в хозяйстве проводили эксплуатационные испытания автотракторной техники. За период испытаний отказов машин по причине недостаточной долговечности восстановленных неподвижных соединений подшипников не наблюдалось. Годовой экономический эффект от внедрения новой технологии составил около 354 тыс. руб.

Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе ФГБОУ ВПО ЛГТУ при изучении дисциплин «Технология ремонта автомобилей и тракторов», «Техническая эксплуатация автомобилей и тракторов».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1) Получена формула для расчета рабочего радиального зазора в подшипнике с полимерным покрытием (16), которая учитывает натяг полимерной посадки «корпус-подшипник», деформационно-прочностные свойства полимерного материала, контактные деформации между телами и дорожками качения колец подшипника.
- 2) Разработан способ восстановления изношенных посадочных отверстий в корпусных деталях, обеспечивающий повышение точности размеров отверстий с полимерным покрытием, за счет исключения влияния усадки полимерного материала при отверждении.
- 3) Определен оптимальный режим термической обработки пленок эластомера Ф-40С: температура 180°C, время 3 ч. Модуль упругости эластомера Ф-40С в 1,2 раза превышает модуль упругости эластомера Ф-40. Значения модуля упругости при сжатии эластомера Ф-40С существенным образом зависят от деформации и толщины покрытия материала. Эластомер Ф-40С имеет высокие адгезионные свойства. Адгезионная прочность эластомера Ф-40С в 3,38 раза превышает показатель эластомера Ф-40.
- 4) Не следует назначать натяги более 30 мкм, так как это приведет к резкому увеличению модуля упругости и, в соответствии с формулами (5) и (6), уменьшению радиального зазора и в конечном итоге заклиниванию тел качения. Не допускается эксплуатация подшипниковых узлов, с посадочными местами восстановленными эластомером Ф-40С, при температурах превышающих рабочий диапазон 70...90°C, так как при температурах более 106°C радиальный и осевой зазоры выбираются, что увеличивает потери на трение и интенсифицирует изнашивание тел и дорожек качения.
- 5) Экспериментально установлены оптимальные геометрические параметры калибра-резца: передний угол  $\gamma = 70^\circ$ , задний угол  $\alpha = 10^\circ$ , обеспечивающие высокое качество и точность покрытия: площадь разрушенного покрытия эластомера Ф-40С после обработки калибром-резцом составляет 4,2 % а отклонение от круглости не превышает 3 мкм.
- 6) Восстановление изношенных отверстий в корпусных деталях эластомером Ф-40С обеспечивает высокую долговечность посадочных мест подшипников. Рекомендуется восстанавливать изношенные посадочные отверстия под подшипники с диаметральной износом до 0,2 мм.
- 7) На основе результатов исследований разработана технология восстановления посадочных отверстий под подшипники в корпусных деталях эластомером Ф-40С. Технология восстановления внедрена в ЗАО «Агрофирма имени «15 лет Октября» Лебедянского района, Липецкой области. Годовой экономический эффект от внедрения новой технологии составил около 354 тыс. руб.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

**В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1 Кирсанов, Ф. А. Оптимальный режим термической обработки модификации эластомера Ф-40С для восстановления корпусных деталей [Текст] / Ли Р. И., Кирсанов Ф. А. // Вестник МичГАУ. – 2013. – № 3. – С. 80-83.

2 Кирсанов, Ф. А. Повышение эффективности восстановления посадочных отверстий корпусных деталей сельскохозяйственной техники при модификации эластомеров [Текст] / Ли Р. И., Кирсанов Ф. А., Машин, Д. В., Колесников А. А. // Труды ГОСНИТИ. - М.: Изд-во ГОСНИТИ, 2013. - Т. 111. – Ч. 2. – С. 134-136.

3 Кирсанов, Ф. А. Технологические аспекты повышения эффективности восстановления корпусных деталей автотракторной техники эластомерами [Текст] / Ли Р. И., Кирсанов Ф. А. // Труды ГОСНИТИ. - М.: Изд-во ГОСНИТИ, 2014. - Т. 114. – С. 100-103.

4 Кирсанов, Ф. А. Расчет оптимального натяга посадки «подшипник-корпус», восстановленной полимерным материалом // Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК: матер. Междунар. науч. практ. конф. 23 –25 апреля 2014 года. – Мичуринск: Изд-во МичГАУ, 2014. – С. 271. ISBN 978-5-94664-294-1

**В сборниках научных трудов и материалах конференции:**

5 Кирсанов, Ф. А. Модификация эластомера Ф-40 для восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях [Текст] / Ли Р. И., Кирсанов Ф. А. // Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию кафедры технологии машиностроения ЛГТУ 17-19 мая 2012 г. «Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии». – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2012. - С. 254-257.

6 Кирсанов, Ф. А. Деформационно-прочностные свойства модификации эластомера Ф-40 [Текст] / Ли Р. И., Кирсанов Ф.А. // Вестник ЛГТУ. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2012. - №1(20). - С. 47-49.

7 Кирсанов, Ф. А. Исследование деформационно-прочностных свойств модификации эластомера Ф-40 [Текст] / Ли Р. И., Кирсанов Ф. А. // Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов ЛГТУ: В 2-х ч. Ч.1. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2012. – С. 274-275.

8 Кирсанов, Ф. А. Влияние режимов термообработки на деформационно-прочностные свойства модификации эластомера Ф-40 [Текст] / Ли Р. И., Кирсанов Ф. А. // Материалы XVI Международной научно-производственной конференции: Инновационные пути развития АПК на современном этапе. – Белгород: Изд-во Бел. ГСХА, 2012. - С. 174.

9 Кирсанов, Ф. А. Перспективные полимеры и композиционные материалы на их основе для ремонта подшипниковых узлов техники [Текст] / Ли Р. И., Кирсанов Ф. А., Кузнецов М.М., Машин Д. В. // Материалы международной научно-производственной конференции «Современные проблемы инновационного развития агроинженерии» 20-21 ноября 2012 г. в 2 ч. – Белгород: Изд-во Бел. ГСХА, 2012. – Ч. 2. - С. 77-81.

10 Кирсанов, Ф. А. Оптимизация режима термической обработки полимерных покрытий эластомера Ф-40С [Текст] / Ли Р. И., Кирсанов Ф. А. // Молодежь-Наука-Производство: Сборник трудов област. науч.-практ. конф. по проблемам техн.

- наук. – 24-25 апреля 2013 г., г. Липецк. - Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2013. – С. 20-23.
- 11 Кирсанов, Ф. А. Деформационно-прочностные и адгезионные свойства эластомера Ф-40С [Текст] / Ли Р. И., Кирсанов Ф. А. // Бюллетень научных работ. Вып. 34. – Белгород : Изд-во БелГСХА, 2013. - С. 93-97.
- 12 Кирсанов, Ф. А. Теоретические предпосылки повышения эффективности восстановления отверстий корпусных деталей полимерными материалами [Текст] / Ли Р. И., Кирсанов Ф. А. // «Проблемы и перспективы инновационного развития животноводства» : матер. междунар. науч.-произв. конф. Белгород, 15-16 мая 2013 г. / Бел. ГСХА. – п. Майский : Изд-во БелГСХА им. В.Я. Горина, 2013. – С. 158.
- 13 Кирсанов, Ф. А. Исследование и определение оптимального режима термической обработки модификации эластомера Ф-40-С [Текст] / Ли Р. И., Кирсанов Ф. А. // «Особенности технического и технологического оснащения современного сельскохозяйственного производства» : сборник : материалы к междунар. научно-практической конф. 04-05 апреля 2013 г. / под ред. М.М. Ревякина, С.А. Зайцева. – Орел : Изд-во ОрелГАУ, 2013. – С. 326-331.
- 14 Кирсанов, Ф. А. Теоретические аспекты определения натяга посадки «подшипник-корпус», восстановленной эластомером Ф-40С [Текст] / Ли Р. И., Кирсанов Ф. А. // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства : сборник науч. докладов XVII Междунар.науч.-практ. конф.,24-25 сентября 2013 г., г. Тамбов. – Тамбов : Изд-во Першина Р.В., 2013. – С. 211-213.
- 15 Кирсанов, Ф. А. Податливость опор качения восстановленных эластомером Ф-40С и композицией на его основе [Текст] / Ли Р. И., Кирсанов Ф. А., Машин Д. В., // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства : сборник науч. докладов XVII Междунар.науч.-практ. конф.,24-25 сентября 2013 г., г. Тамбов. – Тамбов : Изд-во Першина Р.В., 2013. – С. 278-281.
- 16 Кирсанов, Ф. А. Теоретические аспекты определения натяга посадки «подшипник-корпус», восстановленной полимерным материалом [Текст] / Ли Р. И., Кирсанов Ф. А. // Наука в центральной России. – 2013. - № 4. – С . 25-29.
- 17 Кирсанов, Ф. А. Теоретические аспекты определения оптимального натяга полимерного покрытия при восстановлении посадочных отверстий в корпусных деталях [Текст] / Ли Р. И., Кирсанов Ф. А. // Научно-практический журнал «Агротехника и энергообеспечение». – 2014. - №1(1). – С. 327-332.
- 18 Кирсанов, Ф. А. Теоретические аспекты обеспечения радиального зазора в подшипниковых узлах при восстановлении корпусных деталей машин полимерными материалами // Современная металлургия начала нового тысячелетия. К 80-летию НЛМК. [Текст]: сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. Конф. 17-21 ноября 2014 г. Ч. 2. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, С. 80-87.