

На правах рукописи

КУЗНЕЦОВ Михаил Михайлович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ
НЕПОДВИЖНЫХ СОЕДИНЕНИЙ «ВАЛ-ПОДШИПНИК»
В УЗЛАХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ
ЦИАНАКРИЛАТНЫМ КЛЕЕМ ТК-200**

Специальность 05.20.03 Технологии и средства технического
обслуживания в сельском хозяйстве

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Мичуринск – наукоград РФ, 2013

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: **Жачкин Сергей Юрьевич**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный
технический университет/кафедра автоматизи-
рованного оборудования машиностроительно-
го производства, профессор

Нагорнов Станислав Александрович
доктор технических наук, профессор,
ГНУ «Всероссийский научно-
исследовательский институт использования
техники и нефтепродуктов Российской акаде-
мии сельскохозяйственных наук», заместитель
директора по научной работе

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Орловский государственный
аграрный университет»

Защита диссертации состоится « 17 » октября 2013 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета ДМ 220.041.03 при ФГБОУ ВПО «Мичуринский государственный аграрный университет» по адресу: 393760, Тамбовская область, г. Мичуринск, ул. Интернациональная, 101, зал заседаний диссертационных советов.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Мичуринский государственный аграрный университет».

Автореферат разослан « » августа 2013 г. и размещен на сайтах www.vak.ed.gov.ru и www.mgau.ru

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

Ланцев В.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Подшипники качения и детали типа «вал» являются типовыми деталями и поэтому относятся к категории многочисленных элементов в конструкции сельскохозяйственной техники. По этой причине ресурс деталей данной категории в значительной мере определяет надежность техники. Одной из основных причин интенсивного изнашивания вышеупомянутых деталей является износ неподвижных соединений «вал-подшипник» по причине фреттинг-коррозии.

Способы восстановления неподвижных соединений подшипников качения полимерными материалами отличаются простотой и низкой себестоимостью, исключают явление фреттинг-коррозии и позволяют повысить долговечность валов, подшипников и зубчатых колес.

Отечественная химическая промышленность постоянно выпускает новые полимерные материалы, которые отличаются широким спектром потребительских свойств. Это создает основу для разработки высокоэффективных технологий восстановления, обеспечивающих дальнейшее повышение долговечности валов и подшипников в узлах сельскохозяйственной техники.

Степень разработанности темы. Вопросам восстановления неподвижных соединений «вал-подшипник» в узлах сельскохозяйственной техники полимерными материалами посвящены труды Аязбаева М. Д., Баскакова В. Н., Бутина А. В., Бочарова А. В., Гаджиева А. А., Дейнеги П. Б., Карапатницкого А. М., Курчаткина В. В., Ли Р. И., Мельниченко И. М., Тоирова И. Ж., Щетина М. В. и многих других отечественных ученых. Неподвижные соединения «вал-подшипник» восстанавливают эпоксидными составами, эластомерами, анаэробными герметиками, акриловыми адгезивами и композициями на их основе.

Литературный обзор показал, что вопрос повышения долговечности подшипников в соединениях «вал-подшипник», восстановленных полимерными материалами, изучен не в полной мере. Отсутствуют исследования распределения нагрузки между телами качения, формирования параметров контакта нагруженных тел с дорожками качения, долговечности подшипников с восстановленными неподвижными соединениями «вал-подшипник». Не изучен вопрос напряженного состояния клеевого шва в соединении «вал-подшипник» при радиальном нагружении, что не позволяет рассчитывать деформации и напряжения в полимерном слое.

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 «Высокоэффективные технологии и оборудование в области машиностроения».

Цель работы. Повышение эффективности восстановления неподвижных соединений «вал-подшипник» в узлах сельскохозяйственной техники клеями за счет снижения контактных напряжений в подшипнике и высокого ресурса

клеевого шва, обеспечивающих повышение долговечности подшипниковых узлов и снижение затрат на ремонт.

Объект исследований. Пленки и клеевые соединения "вал-подшипник", выполненные цианакрилатным адгезивом ТК-200.

Предмет исследования. Деформационно-прочностные свойства пленок цианакрилатного клея ТК-200, прочность и долговечность клеевых соединений "вал-подшипник", выполненных цианакрилатным адгезивом ТК-200, контактные напряжения и ресурс подшипников с соединениями ТК-200.

Методика исследования представлена теоретическими исследованиями на основе теории упругости, экспериментальными исследованиями процесса полимеризации, деформационно-прочностных свойств пленок и клеевых соединений цианакрилатного адгезива ТК-200, контактных напряжений нагруженных тел с дорожкой качения внутреннего кольца подшипника, долговечности подшипников качения при местном и циркуляционном нагружении колец подшипников и неподвижных соединений подшипников качения восстановленных цианакрилатным клеем ТК-200. Достоверность полученных результатов исследования обусловлена применением современного исследовательского оборудования и приборов, методов дисперсионного анализа, результатами эксплуатационных испытаний.

На защиту выносятся:

- теоретические предпосылки повышения эффективности восстановления соединений «вал-подшипник» клеями;
- результаты экспериментальных исследований процесса полимеризации, деформационно-прочностных свойств пленок и клеевых соединений цианакрилатного адгезива ТК-200, контактных напряжений нагруженных тел с дорожкой качения внутреннего кольца подшипника, долговечности подшипников качения при местном и циркуляционном нагружении колец подшипников и неподвижных соединений подшипников качения восстановленных цианакрилатным клеем ТК-200;
- технология восстановления неподвижных соединений «вал-подшипник» цианакрилатным клеем ТК-200 и технико-экономическая эффективность ее использования.

Научная новизна диссертации заключается в получении математической модели деформированного кольца подшипника при радиальном нагружении, модели напряженного состояния клеевого шва в соединении «вал-подшипник», исследовании полимеризации и деформационно-прочностных свойств пленок и клеевых соединений адгезива ТК-200, параметров контакта нагруженных тел с дорожкой качения подшипника, долговечности подшипниковых узлов, восстановленных адгезивом ТК-200.

Практическая ценность заключается в разработанной технологии восстановления неподвижных соединений «вал-подшипник» в узлах сельскохозяйственной техники цианакрилатным клеем ТК-200.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на:

- научных конференциях профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов Липецкого государственного технического университета в 2011...2013 гг.;
- Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию кафедры технологии машиностроения ЛГТУ «Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии» (г. Липецк), 2012 г.;
- Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых "Особенности технического оснащения современного сельскохозяйственного производства" 24-25 апреля 2012 г., ОГАУ (г. Орел), 2012 г.;
- XVI Международной научно-производственной конференции "Инновационные пути развития АПК на современном этапе", Бел. ГСХА (г. Белгород), 2012г.;
- Международной научно-производственной конференции «Современные проблемы инновационного развития агроинженерии» 20-21 ноября 2012 г., Бел. ГСХА (г. Белгород), 2012 г.;
- XVII Международной научно-производственной конференции "Научные проблемы технического сервиса сельскохозяйственных машин", ГОСНИТИ (г. Москва), 2012 г.;
- Международной научно-практической конференции "Особенности технического оснащения современного с.х. производства" 04 - 05 апреля 2013 г., ОГАУ (г. Орел);
- Областной научно-практической конференции по проблемам технических наук "МОЛОДЕЖЬ-НАУКА-ПРОИЗВОДСТВО", ЛГТУ (г. Липецк), 2013 г.;
- заседании кафедры "Транспортные средства и техносферная безопасность" ЛГТУ в 2013 г.

Публикации. По результатам выполненной работы опубликовано – 13 печатных работ, в том числе три статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 133 страницах машинописного текста, содержит 48 рисунков, 3 таблицы, 4 приложения и библиографию из 114 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 современных технологий восстановления неподвижных соединений «вал-подшипник» полимерными материалами, рассмотрены способы повышения долговечности подшипников качения, модели напряженного состояния неподвижных соединений, восстановленных полимерными материалами в подшипниковых узлах, сформулированы цель и задачи исследований.

Решению научных задач и проблем технологии ремонта и восстановления изношенных деталей посвящены труды Ачкасова К. А., 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., Нагорнова С. А., Пучина Е. А., Черноиванова В. И. и многих других отечественных ученых.

Надежность сельскохозяйственной техники в значительной мере определяется долговечностью типовых деталей: детали типа «вал», подшипники качения, зубчатые колеса, шкивы, корпусные детали. Одной из основных причин интенсивного изнашивания валов и подшипников является износ посадочных мест из-за фреттинг-коррозии. Среднее значение износа посадочных мест подшипников на валах не превышает 0,1 мм. Наиболее рациональными для таких дефектов являются способы восстановления полимерными материалами.

В настоящее время изношенные посадочные места на валах восстанавливают нанесением полимерных покрытий или фиксацией этих поверхностей с сопрягаемыми деталями при помощи адгезивов. Анализ литературных источников показал, что восстановление посадочных мест подшипников на деталях типа «вал» нанесением полимерных покрытий не технологично, так как необходимо послойное нанесение покрытия и его термическая обработка.

Значительно меньшие трудозатраты требует фиксация подшипников на изношенных посадочных местах деталей типа «вал» клеями. Для фиксации деталей на валах в настоящее время используют анаэробные герметики, акриловые адгезивы, а также композиционные материалы на их основе.

Химическая промышленность России постоянно выпускает новые полимерные материалы, которые выгодно отличаются от предыдущих более высокими потребительскими свойствами. Это создает предпосылки для разработки прогрессивных ресурсосберегающих технологических процессов восстановления, которые могут повысить ресурс подшипниковых узлов и соответственно надежность сельскохозяйственной техники. НИИ полимеров им. академика Каргина разработан цианакрилатный клей ТК-200. Практический интерес представляет исследование потребительских свойств перспективного адгезива, изучение возможности применения его при восстановлении неподвижных соединений «вал-подшипник» в узлах сельскохозяйственной техники.

Литературный обзор показал, что теоретические предпосылки повышения эффективности восстановления неподвижных соединений «вал-подшипник» полимерными материалами исследованы не в полной мере и требуют дальнейшего развития. В подшипниках с посадкой наружного кольца, восстановленной полимерным материалом, увеличивается коэффициент распределения нагрузки, снижаются напряжения в зоне контакта нагруженных тел с дорожками качения и в итоге многократно возрастает ресурс. Отсутствует подобная информация о подшипниках с соединениями «вал-подшипник», восстановленными полимерными материалами. Представляют научный и практический интерес теоретические и экспериментальные исследования распределения нагрузки между телами качения, параметров контакта нагруженных тел качения с беговыми дорожками, долговечности подшипников с восстановленными неподвижными соединениями «вал-подшипник».

Высокую долговечность клеевых соединений в подшипниковых узлах можно обеспечить при наличии математической модели напряженного состоя-

ния полимерной оболочки, которая позволяет определить деформации и напряжения в любой точке нагруженного клеевого шва. Вопрос исследования напряженного состояния клеевого шва в соединении «вал-подшипник» не достаточно изучен. Представляет научный интерес разработка математической модели, которая позволит определять деформации и напряжения в любой точке нагруженного клеевого шва соединения «вал-подшипник».

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

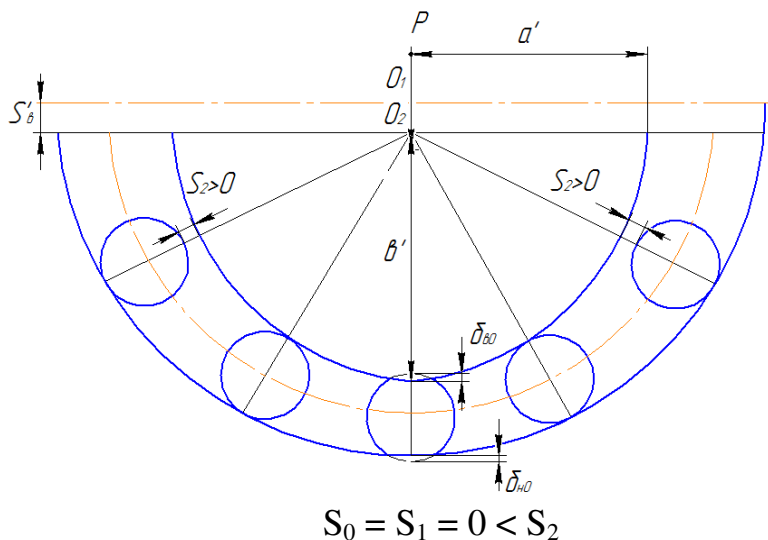
- разработать теоретические предпосылки повышения эффективности клеевых соединений «вал-подшипник»;
- исследовать процесс полимеризации цианакрилатного клея ТК-200 при различных условиях отверждения;
- исследовать деформационно-прочностные свойства клеевых соединений, клея ТК-200;
- исследовать коэффициенты Кирхгофа и податливости в клеевых соединениях клея ТК-200;
- исследовать параметры контакта нагруженных тел качения с беговой дорожкой внутреннего кольца подшипника;
- исследовать контактные напряжения нагруженных тел качения с беговой дорожкой внутреннего кольца подшипника;
- исследовать долговечность неподвижных соединений подшипников качения восстановленных цианакрилатным клеем ТК-200;
- исследовать долговечность подшипников качения при местном и циркуляционном нагружении колец подшипников;
- разработать технологию восстановления неподвижных соединений «вал-подшипник» цианакрилатным клеем ТК-200 и оценить ее технико-экономическую эффективность.

Во второй главе «Теоретические предпосылки повышения эффективности восстановления клеевых соединений «вал-подшипник» разработаны математическая модель деформированного внутреннего кольца подшипника при радиальном нагружении и модель напряженного состояния клеевого шва в соединении «вал-подшипник».

Математическая модель деформированного внутреннего кольца подшипника при радиальном нагружении. Одним из способов повышения долговечности подшипников качения является перераспределение нагрузки с центрального, наиболее нагруженного тела, на первые и вторые боковые тела качения. Это возможно при определенной деформации наружного и внутреннего колец подшипника под действием радиальной нагрузки.

Деформация наружного кольца при нагружении определяется его посадкой в посадочное отверстие. В корпусных деталях посадка наружных колец подшипников осуществляется, как правило, с зазором. При посадке с зазором наружное кольцо подшипника деформируется в эллипс, при этом большая ось эллипса перпендикулярна направлению радиальной нагрузки. Без нагрузки зазор между центральным телом и дорожкой качения внутреннего кольца будет выбран, а между первыми, вторыми боковыми телами и дорожкой качения

внутреннего кольца отличен от нуля. При определенной нагрузке на подшипник возникнут деформации в зоне контакта центрального тела качения с беговыми дорожками внутреннего $\delta_{в0}$ и наружного $\delta_{н0}$ колец подшипника, деформация внутреннего кольца в эллипс, а зазор между первыми боковыми телами и дорожкой качения внутреннего кольца будет выбран (рисунок 1).



$S'_в$ – смещение оси внутреннего кольца при радиальной нагрузке

Рисунок 1 – Подшипник при радиальной нагрузке P , обеспечивающей выбор радиального зазора между первыми боковыми телами и дорожкой качения внутреннего кольца

С дальнейшим увеличением радиальной нагрузки, последняя будет распределяться на первые боковые тела качения. По достижении определенного значения нагрузки и, соответствующей ей дальнейшей деформации внутреннего кольца в эллипс, зазор между вторыми боковыми телами и дорожкой качения внутреннего кольца будет выбран (рисунок 2).

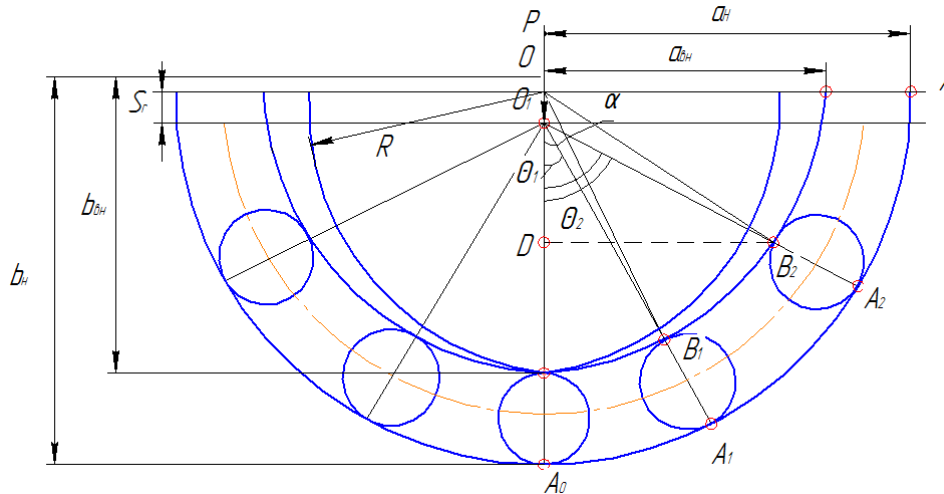
Если радиальную нагрузку увеличивать дальше, часть ее будет распределяться на вторые боковые тела качения. Радиус эллипса O_1B_2 это параметр, определяющий деформацию внутреннего кольца подшипника, т.е. условия при которых обеспечивается передача радиальной нагрузки на первые и вторые боковые тела качения в подшипнике с клеевым соединением «вал-подшипник».

Получена формула радиуса эллипса r_α

$$r_\alpha = \frac{b_{вн}}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \alpha}} = \frac{D_1^2}{2(D_1 + S_n) \sqrt{1 - \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_1 + S_n}\right)^4\right] \sin^2 \alpha}}, \quad (1)$$

где $b_{вн}$ – малая полуось эллипса, в который деформируется внутреннее кольцо при радиальной нагрузке, $b_{вн} = OA_0 = \frac{D_1^2}{2(D_1 + S_n)}$; D_1 – диаметр наружного кольца по дну желоба с учетом радиального зазора, $D_1 = d_1 + 2d_{ш} + S_r$; d_1 – диаметр внутреннего кольца по дну желоба, $d_1 = D_0 - d_{ш}$; D_0 – диаметр центральной окружно-

сти, $D_0 = \frac{D+d}{2}$; D и d – диаметры наружного и внутреннего колец подшипника соответственно, по посадочному месту; $d_{ш}$ – диаметр шарика; S_r – радиальный зазор; S_n – зазор посадки наружного кольца.



a_n и b_n – большая и малая полуоси эллипса в который деформируется наружное кольцо подшипника; a_b и b_b – большая и малая полуоси эллипса в который деформируется внутреннее кольцо подшипника; R – радиус внутреннего кольца до деформации; S_r – смещение оси подшипника при радиальной нагрузке; O и O_1 – ось подшипника до и после радиального нагружения; α – угол между телами качения до радиального нагружения; θ_1 – угол между центральным и первыми боковыми телами качения после радиального нагружения; θ_2 – угол между центральным и вторыми боковыми телами качения после радиального нагружения

Рисунок 2 – Схема деформации колец подшипника при радиальной нагрузке P , обеспечивающей выбор радиального зазора между телами качения и беговыми дорожками:

Определим формулу радиуса эллипса r_θ

$$OB_2 = OA_2 - d_{ш} = r_{2\alpha} - d_{ш}, \quad DB_2 = OB_2 \sin 2\alpha, \quad OD = OB_2 \cos 2\alpha,$$

$$O_1D = OD - OO_1 = OB_2 \cos 2\alpha - S_n, \quad O_1B_2 = \sqrt{O_1D^2 + DB_2^2}, \quad \text{tg } \theta_2 = \frac{DB_2}{O_1D}$$

После ряда преобразований получены:

- формула радиуса эллипса r_θ внутреннего кольца подшипника при радиальном нагружении

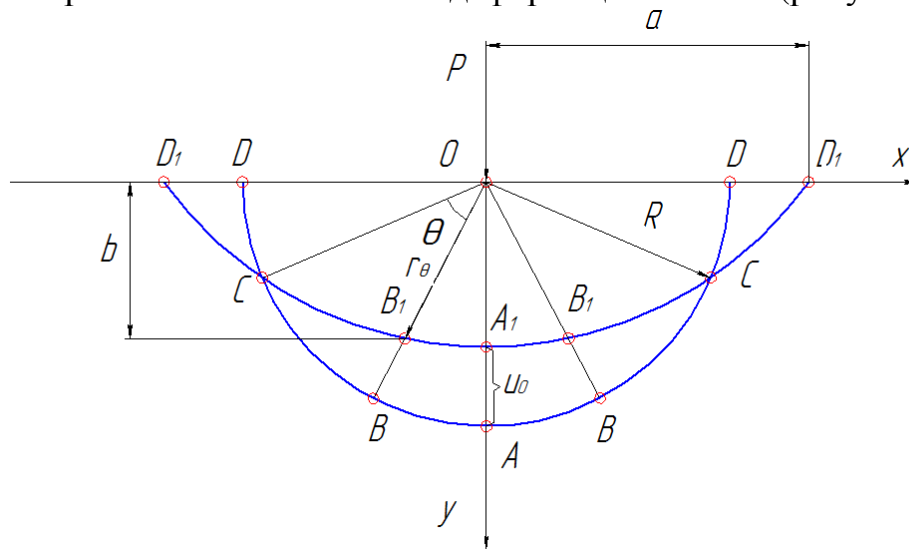
$$r_\theta = \sqrt{[(r_\alpha - d_{ш}) \cos \alpha - S_n]^2 + [(r_\alpha - d_{ш}) \sin \alpha]^2}, \quad (2)$$

- формула угла между смежными телами качения θ при радиальном нагружении подшипника

$$\text{tg } \theta = \frac{(r_\alpha - d_{ш}) \sin \alpha}{(r_\alpha - d_{ш}) \cos \alpha - S_n} \quad (3)$$

Формула (2) позволяет рассчитать зазор между первым, вторым боковыми телами и дорожкой качения внутреннего кольца подшипника любого типоразмера подшипника. Это позволяет по известным формулам Курчаткина В. В. определить значения коэффициента податливости внутреннего кольца с полимерным слоем, при которых нагрузка с центрального тела перераспределится на первые и вторые боковые тела качения.

Модель напряженного состояния клевого шва в соединении «вал-подшипник». Кривая A_1D_1 представляет собой деформированный участок полимерного слоя при действии радиальной нагрузки P . Вдоль малой полуоси эллипса b в полимерном слое имеют место деформации сжатия (рисунок 3).



P – радиальная нагрузка; R – радиус от оси до внутреннего кольца подшипника; θ – полярный угол; r_θ – полярный радиус; $AA_1(u_0)$, BB_1 – деформация полимерного слоя по внутреннему контуру напротив центрального и первого боковых тел качения, вдоль малой полуоси эллипса b соответственно; DD_1 – деформация полимерного слоя вдоль большой полуоси эллипса a

Рисунок 3 – Деформация внутреннего кольца подшипника с полимерным слоем при радиальном нагружении:

Координаты любой точки на кривой A_1D_1 можно определить по радиусу эллипса r_θ

$$r_\theta = \frac{b}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \theta}} = \frac{R - u_0}{\sqrt{1 - \left[1 - \left(1 - \frac{u_0}{R}\right)^4\right] \sin^2 \theta}}, \quad (4)$$

где b – малая полуось эллипса в который деформируется полимерный слой при радиальном нагружении, $b = R - u_0$; u_0 – деформация полимерного слоя напротив центрального тела качения.

Задача теории упругости решена методом перемещений.

В результате получены формулы для определения:

а) относительной деформации в радиальном направлении ϵ_r в зависимости от полярного радиуса и значения радиальной нагрузки

$$\varepsilon_r = \frac{R - \frac{b}{\sqrt{1 - c \sin^2 \theta}}}{h_n}, \quad (5)$$

где c – коэффициент, $c = \left[1 - \left(1 - \frac{u_0}{R}\right)^4\right]$; h_n – толщина полимерного слоя.

б) относительной деформации в окружном направлении

$$\varepsilon_\theta = \frac{\mu}{h_n} \left[\frac{bc \cos \theta \sin \theta}{\sqrt{1 - c \sin^2 \theta} (c \sin^2 \theta - 1)} - \frac{b}{\sqrt{1 - c \sin^2 \theta}} + R \right] - \left(1 - \frac{b}{R\sqrt{1 - c \sin^2 \theta}}\right), \quad (6)$$

где μ – коэффициент Пуассона полимерного материала.

в) деформации сдвига

$$\gamma_{r\theta} = \frac{bc \cos \theta \sin \theta}{R\sqrt{1 - c \sin^2 \theta} (c \sin^2 \theta - 1)} - \mu \theta \frac{\left(R - \frac{b}{\sqrt{1 - c \sin^2 \theta}}\right)}{h_n} \quad (7)$$

г) радиального напряжения в полимерном слое

$$\sigma_r = \frac{E}{1 - \mu^2} \left\{ \begin{aligned} & \frac{R - \frac{b}{\sqrt{1 - c \sin^2 \theta}}}{h_n} + \frac{\mu^2}{h_n} \left(\frac{bc \cos \theta \sin \theta}{\sqrt{1 - c \sin^2 \theta} (c \sin^2 \theta - 1)} - \right. \\ & \left. - \frac{b}{\sqrt{1 - c \sin^2 \theta}} + R \right) - \mu \left(1 - \frac{b}{R\sqrt{1 - c \sin^2 \theta}}\right) \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

где E – модуль упругости полимерного материала.

д) окружного напряжения в полимерном слое

$$\sigma_\theta = \frac{E}{1 - \mu^2} \left\{ \begin{aligned} & \frac{\mu \left(R - \frac{b}{\sqrt{1 - c \sin^2 \theta}}\right)}{h_n} + \frac{\mu}{h_n} \left(\frac{bc \cos \theta \sin \theta}{\sqrt{1 - c \sin^2 \theta} (c \sin^2 \theta - 1)} - \right. \\ & \left. - \frac{b}{\sqrt{1 - c \sin^2 \theta}} + R \right) - \left(1 - \frac{b}{R\sqrt{1 - c \sin^2 \theta}}\right) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

е) относительной деформации в осевом направлении

$$\varepsilon_z = -\frac{\mu}{(1 - \mu)} \left\{ \begin{aligned} & \frac{R - \frac{b}{\sqrt{1 - c \sin^2 \theta}}}{h_n} + \frac{\mu}{h_n} \left(\frac{bc \cos \theta \sin \theta}{\sqrt{1 - c \sin^2 \theta} (c \sin^2 \theta - 1)} - \frac{b}{\sqrt{1 - c \sin^2 \theta}} \right. \\ & \left. + R \right) - \left(1 - \frac{b}{R\sqrt{1 - c \sin^2 \theta}}\right) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ж) касательного напряжения в полимерном слое

$$\tau_{r\theta} = \frac{f_n P}{4\pi B h_n} - \frac{E}{(1 + \mu)} \left\{ \frac{bc \cos \theta \sin \theta}{R\sqrt{1 - c \sin^2 \theta} (c \sin^2 \theta - 1)} - \mu \theta \frac{\left(R - \frac{b}{\sqrt{1 - c \sin^2 \theta}}\right)}{h_n} \right\}, \quad (11)$$

где f_n – коэффициент трения в подшипнике; P – эквивалентная нагрузка на подшипник; B – ширина кольца подшипника.

В третьей главе «Методика экспериментальных исследований» приведены общая методика исследований и частные методики исследования деформационно-прочностных свойств пленок цианакрилатного клея ТК-200, полимеризации, прочности и долговечности клеевых соединений "вал-подшипник", выполненных цианакрилатным адгезивом ТК-200, контактных напряжений и ресурса подшипников с соединениями ТК-200.

Процесс полимеризации адгезива ТК-200 исследовали методом диэлькометрии при температурах отверждения $T = 20; 30; 40^{\circ}\text{C}$. Температуру в 30 и 40°C обеспечивали в шкафу сушильном СНОЛ-3.5,3.5,3.5/3, оснащенным электронным терморегулятором. Образцами служили клеевые соединения подшипников 209 с валами. Валы изготовили из стали 45. Диаметральный зазор в соединении до склеивания составлял 0,1 мм. Электрическую емкость клеевого шва соединения измеряли прибором Е7-11 и по ней рассчитывали диэлектрическую проницаемость. О завершении полимеризации судили по стабилизации значений диэлектрической проницаемости клеевого шва.

Прочность клеевых соединений ТК-200 исследовали на образцах, представляющих клеевые соединения внутренних колец подшипников 209 с валами, изготовленными из стали 45. Радиальный зазор в соединении до склеивания $S = 0,05; 0,075$ и 0,1, мм обеспечивали шлифованием валов. Отверждение соединений проводили в течение 24 ч при температуре 20°C . Испытания образцов проводили на разрывной машине ИР 5047-50.

Деформационно-прочностные свойства пленок адгезива ТК-200 исследовали в соответствии с ГОСТ 14236-81 и ГОСТ 12423-66. Испытания образцов осуществляли на разрывной машине ИР 5047-50 с одновременной записью диаграммы "нагрузка-деформация".

В исследованиях коэффициента Кирхгофа и коэффициента податливости применяли шарик диаметром $D = 12,7$ мм и пластину из стали ШХ-15 размерами $100 \times 25 \times 4,92$ мм с подложкой из адгезива ТК-200. Размеры пластины обеспечивают жесткость, соответствующую моменту инерции поперечного сечения наружного кольца подшипника 209. Пластины устанавливали полимерным покрытием вниз на поверочную плиту 2-1-250 \times 250 ГОСТ 10905-75, размещенную на опорной раме стенда. Для получения пятна контакта, между шариком и пластиной, проложили полоску копировальной бумаги марки МВ-16 ГОСТ 489-88. Нагрузку на шарик создавали нагрузочной вилкой стенда. При нагружении шарика, измеряли деформацию пластины измерительной головкой 1МИГ с ценой деления 0,001 мм, установленной на штативе.

Исследования параметров контакта и контактных напряжений нагруженных тел с беговой дорожкой внутреннего кольца подшипника проводили на стенде для испытания подшипников при статическом нагружении. Образцами являлись подшипники 209 склеенные с валом адгезивом ТК-200. В начале исследовали зависимость площади пятна контакта шарика с беговой дорожкой внутреннего кольца подшипника. Два подшипника 209 разобрали и внутренние кольца склеили адгезивом ТК-200 с валом стенда. Наружные кольца подшипников запрессовали в отверстия подшипниковых щитов стенда с нулевым натягом. Затем собрали сепараторы, предварительно удалив по 8 шариков и оставив

по одному шарик в каждом сепараторе. Перед сборкой подшипников на поверхность дорожки качения внутреннего кольца подшипника приклеили полоску копировальной бумаги МВ-16 ГОСТ 489-99. Затем на беговую дорожку наружного кольца установили сепаратор с одним телом качения. Центральное тело качения было установлено вдоль оси действия нагрузки. Для фиксации положения шарика сепаратор фиксировали специальным приспособлением. Затем установили вал внутренними кольцами на тела качения. Нагрузку на испытываемые подшипники создавали при помощи нагружающих рычагов стенда. Испытания проводили при нагрузках $P = 1969,8; 2954,7; 3939,6; 4919,6$ и $5909,4$ Н. Через 0,25 ч после нагружения подшипниковые узлы разобрали. Полученные отпечатки площадки контакта на копировальной бумаге исследовали при помощи микроскопа МПБ-2.

На следующем этапе исследовали распределение нагрузки между телами качения и напряжения в зоне контакта нагруженных тел с дорожкой качения внутреннего кольца в подшипнике 209 склеенного с валом адгезивом ТК-200. Методика подготовки к эксперименту аналогична методике предыдущего этапа исследований, с разницей, что в сепараторах были удалены по 4 шарика, а при нагружении стенда фиксировали пятна контакта 5 шариков с дорожкой качения внутреннего кольца. Значения полуосей a и b эллипса площадки контакта тел с дорожкой качения внутреннего кольца подшипника измеряли при помощи микроскопа МПБ-2.

Исследование долговечности неподвижных соединений, восстановленных клеем ТК-200, и подшипников при местном нагружении внутренних колец проводили на вибростенде. Радиальная нагрузка на подшипники 209 составляла 20 кН. За критерий долговечности клеевых соединений приняли наработку до начала сдвига наружного кольца подшипника в посадочном отверстии щита, подшипников – предельное значение радиального зазора.

Исследование долговечности подшипников качения при циркуляционном нагружении внутренних колец подшипников проводили на стенде для испытания подшипников при статическом нагружении. Радиальная нагрузка на подшипник 209 составляла 10290 Н. За критерий долговечности подшипника приняли предельное значение радиального зазора.

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований и их анализ» приведены результаты исследования полимеризации, прочности, коэффициента Кирхгофа и коэффициента податливости клеевых соединений адгезива ТК-200, параметров контакта нагруженных тел с дорожкой качения внутреннего кольца подшипника, распределения нагрузки между телами качения и контактных напряжений в подшипнике с клеевым соединением ТК-200, стендовых испытаний подшипниковых узлов восстановленных адгезивом ТК-200.

Исследование полимеризации клеевых соединений адгезива ТК-200. Исследования показали, что в отличие от современных адгезивов марок Ана-терм и Унигерм, цианакрилатный клей ТК-200 выгодно отличается более высокой скоростью полимеризации. По сравнению с современными анаэробными герметиками АН-111, АН-112, акриловым адгезивом АН-105 время при кото-

ром образуется сшитый полимер в адгезиве ТК-200 в 1,71; 1,11 и 1,67 раза меньше и составляет 3,5; 2,3 и 1,8 ч при температурах 20; 30; 40 °С, соответственно.

Исследование прочности клеевых соединений адгезива ТК-200. Эксперимент показал, что клеевые соединения, выполненные адгезивом ТК-200, имеют более высокую прочность, чем у современных адгезивов. Прочность клеевых соединений адгезива ТК-200 составляет 33,3 МПа, что в 2,04 раза больше прочности клеевых соединений акрилового адгезива АН-105 (16,34 МПа) и 1,34 раза – анаэробного герметика АН-111 (24,8 МПа).

Исследование коэффициента Кирхгофа и коэффициента податливости клеевых соединений адгезива ТК-200. Исследованиями установлено, что коэффициент Кирхгофа в клеевом соединении «вал-подшипник», выполненным адгезивом ТК-200, увеличивается по сравнению со стандартным подшипником (парой «сталь-сталь») от 13 до 65% в зависимости от толщины полимерного слоя. С увеличением толщины полимерной подложки из адгезива ТК-200 коэффициент податливости упругого основания уменьшается от 47,4 до 31,52Н/мм².

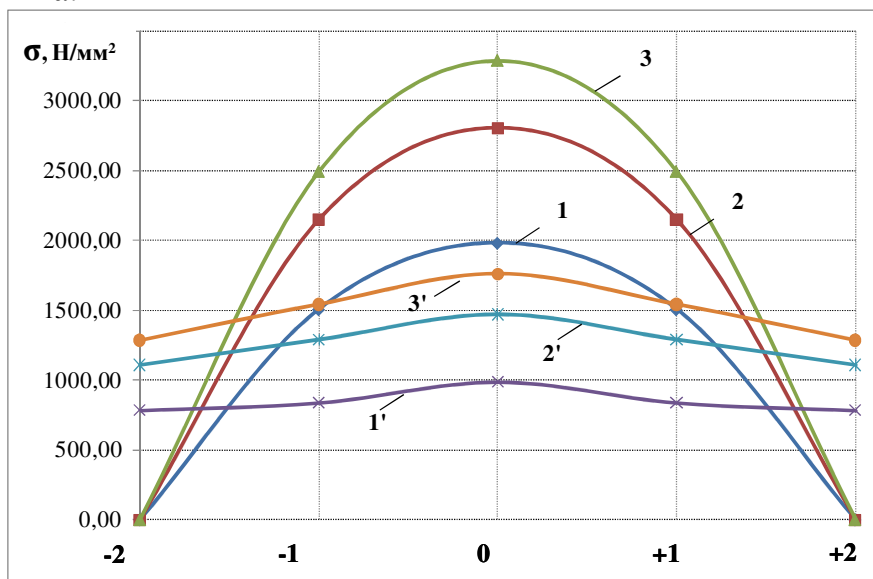
Исследование параметров контакта нагруженных тел с дорожкой качения внутреннего кольца подшипника. Исследования показали, что в зависимости от радиальной нагрузки на подшипник и толщины клеевого шва, площадь пятна контакта увеличивается: в зоне центрального тела до 1,07 раза; в зоне контакта первых боковых тел качения до 1,56 раз по сравнению с расчетной. Благодаря полимерному слою увеличивается угол зоны нагружения подшипника, и поэтому часть внешней радиальной нагрузки распределяется на вторые боковые тела качения. Площадь пятна контакта вторых боковых тел с дорожкой качения составляет от 0,5 до 1,52 мм².

Исследование распределения нагрузки между телами качения и контактными напряжениями в подшипнике с клеевым соединением ТК-200. Эксперимент показал, что при радиальном нагружении подшипника 209 с клеевым соединением ТК-200 в сравнении со стандартным подшипником нагрузка перераспределяется между телами качения. На центральное тело качения нагрузка снижается до 25 %, а на первые боковые тела качения увеличивается до 29 %. Часть внешней радиальной нагрузки распределяется также на вторые боковые тела качения. Коэффициент распределения нагрузки в подшипнике с клеевым соединением ТК-200 в 1,6 раза выше, чем в стандартном подшипнике с нулевым зазором посадки ($K_{рн} = 0,72$ и $0,44$, соответственно).

В подшипнике 209 с клеевым соединением ТК-200 в сравнении с подшипником без полимерного слоя из-за увеличения площади контакта нагруженных тел с дорожкой качения внутреннего кольца снизились контактные напряжения. В зоне контакта: а) центрального тела с дорожкой качения внутреннего кольца подшипника до 2,0 раз; б) первых боковых тел с дорожкой качения до 1,79 раза (рисунок 3).

Исследование долговечности неподвижных соединений подшипников качения восстановленных адгезивом ТК-200. Исследованиями установлено,

что долговечность неподвижного соединения снижается с увеличением толщины клеевого шва.



0; ± 1 ; ± 2 – центральное, первые и вторые боковые тела качения, соответственно; 1, 2, 3 – распределение напряжений в стандартном подшипнике 209 при радиальной нагрузке $P = 2042$; 6127 и 10212 Н; 1', 2', 3' – распределение напряжений в подшипнике с клеевым швом толщиной 0,05 мм при $P = 2042$; 6127 и 10212 Н, соответственно

Рисунок 3 – Распределение контактных напряжений в подшипнике 209 с клеевым соединением ТК-200:

Из рисунка 4 следует, что максимальной допустимой толщиной клеевого шва адгезива ТК-200, обеспечивающей безотказную работу восстановленного неподвижного соединения «вал-подшипник» при циклической нагрузке $P = 20$ кН, является значение $h = 0,05$.

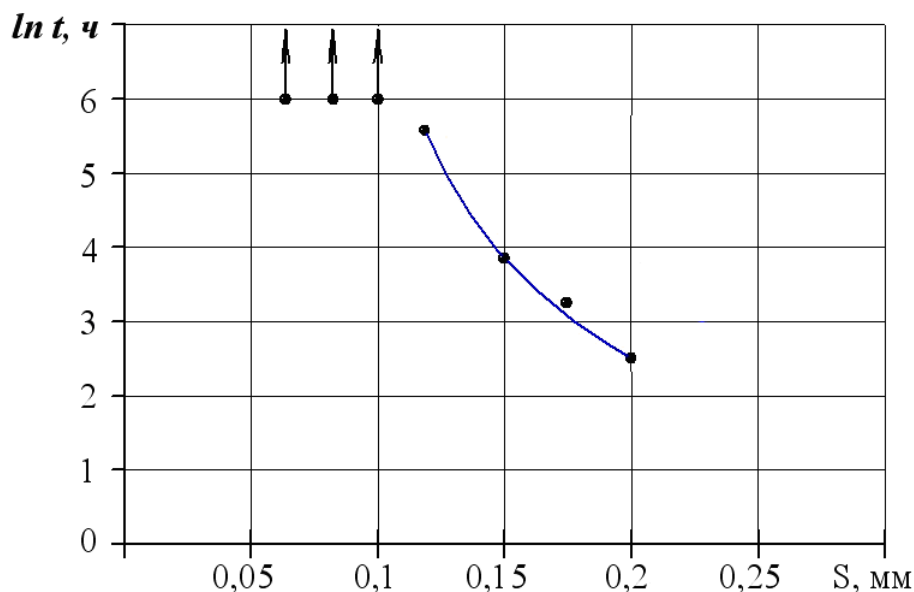
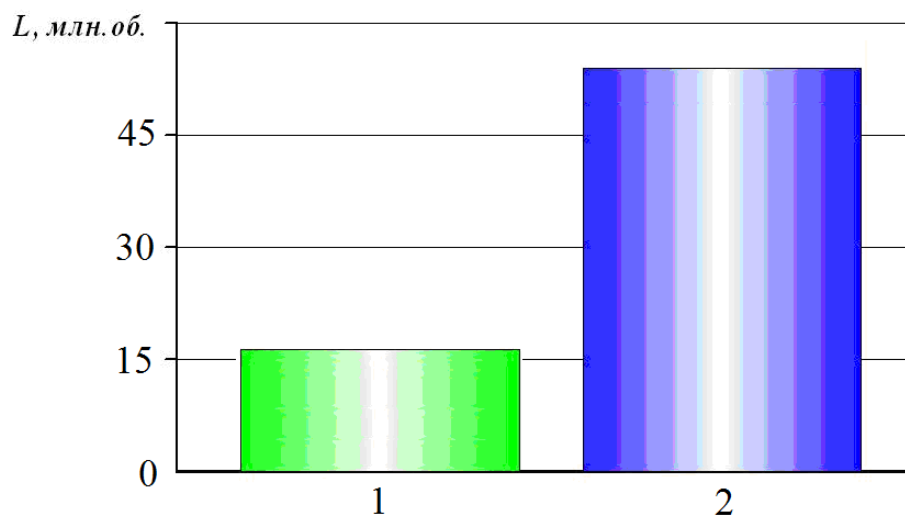


Рисунок 4 – Зависимость долговечности t неподвижных соединений вал-подшипник 209 от диаметральной толщины S клеевого шва адгезива ТК-200 при радиальной нагрузке 20 кН

Исследование долговечности подшипников качения при циркуляционном и местном нагружении колец подшипников. Исследования показали, что долговечность подшипника в соединении «вал-подшипник», выполненным адгезивом ТК-200 увеличилась многократно и зависит от вида нагружения. При циклическом нагружении долговечность составила 49,95 млн. об., что в 3,2 раза превышает расчетную (15,6 млн. об.), а при статическом нагружении – 53,04 млн. об., что в 3,4 раза превышает расчетную долговечность (рисунок 5).



1 – расчетная; 2 – восстановленного адгезивом ТК-200

Рисунок 5 – Долговечность L подшипника 209 при циркуляционном нагружении внутреннего кольца:

В пятой главе «Реализация результатов исследований и их технико-экономическая оценка» приведены разработанная технология восстановления и ее экономическая эффективность.

По результатам проведенных исследований разработана технология восстановления неподвижных соединений «вал-подшипник» цианакрилатным клеем ТК-200, которая содержит следующие операции: очистка посадочных мест деталей соединения; измерение посадочных мест деталей для определения диаметрального зазора в соединении до восстановления; обезжиривание посадочных мест деталей; нанесение клея ТК-200 на посадочные места деталей и сборка соединения; отверждение клеевого соединения; контроль качества клеевого соединения.

Разработанная технология восстановления неподвижных соединений «вал-подшипник» клеем ТК-200 внедрена в ООО «Восход» Добринского района Липецкой области. Для оценки надежности восстановленных неподвижных соединений подшипников качения с февраля 2011 г. по ноябрь 2012 г. в хозяйстве проводили эксплуатационные испытания сельскохозяйственной техники. За период испытаний отказов машин по причине недостаточной долговечности восстановленных неподвижных соединений подшипников не наблюдалось.

Результаты исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВПО ЛГТУ при изучении дисциплин «Технология ремонта автомобилей и тракторов», «Техническая эксплуатация автомобилей и тракторов», «Надежность, эксплуатация и ремонт металлургического оборудования».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате теоретических исследований получены:
 - математическая модель (2) деформированного внутреннего кольца подшипника при радиальном нагружении, которая позволяет рассчитать зазор между первым, вторым боковыми телами и дорожкой качения внутреннего кольца любого типоразмера подшипника. Это позволяет по известным формулам Курчаткина В. В. определить значения коэффициента податливости внутреннего кольца с полимерным слоем, при которых нагрузка с центрального тела перераспределится на первые и вторые боковые тела качения.
 - математическая модель напряженного состояния клеевого шва в восстановленном соединении «вал – подшипник» при радиальном нагружении подшипникового узла. В соответствии с линейной теорией упругости получены основные уравнения (5)...(11) по которым следует определять напряжения и деформации в клеевом шве восстановленного соединения напротив нагруженных тел качения.
2. Исследования показали, что цианакрилатный клей ТК-200 выгодно отличается более высокой скоростью полимеризации. По сравнению с современными анаэробными герметиками АН-111, АН-112, акриловым адгезивом АН-105 время отверждения адгезива ТК-200, в 1,71; 1,11 и 1,67 раза меньше и составляет 3,5; 2,3 и 1,8 ч при температурах 20; 30; 40 °С, соответственно.
3. Адгезив ТК-200 имеет более высокие деформационно-прочностные свойства, чем исследованные ранее современные адгезивы. Прочность клеевых соединений адгезива ТК-200 составляет 33,3 МПа, что в 2,04 раза больше прочности клеевых соединений акрилового адгезива АН-105 (16,34 МПа) и 1,34 раза – анаэробного герметика АН-111 (24,8 МПа). Удельная работа деформации при разрыве пленок цианакрилатного клея ТК-200 превышает аналогичный показатель пленок анаэробного герметика АН-112 на 9, АН-105 – 45, АН-6 – 250 %.
4. Коэффициент Кирхгофа в клеевом соединении «вал-подшипник», выполненным адгезивом ТК-200, увеличивается по сравнению со стандартным подшипником (парой «сталь-сталь») от 13 до 65% в зависимости от толщины полимерного слоя.
5. С увеличением толщины полимерной подложки из адгезива ТК-200 коэффициент податливости упругого основания уменьшается от 47,4 до 31,52 Н/мм².
6. Наличие полимерного слоя в соединении "вал-подшипник" приводит к увеличению площади пятна контакта нагруженных тел с дорожкой качения внутреннего кольца подшипника. В зависимости от радиальной нагрузки на подшипник и толщины клеевого шва, площадь пятна контакта увеличивается: в зоне центрального тела до 1,07 раза; в зоне контакта первых боковых тел качения до 1,56 раз по сравнению с расчетной.
7. При радиальном нагружении подшипника 209 с клеевым соединением ТК-200 в сравнении со стандартным подшипником нагрузка перераспределяется между телами качения. На центральное тело качения нагрузка снижается до 25 %, а на первые боковые тела качения увеличивается до 29 %. Кроме того, увеличивается угол зоны нагружения подшипника и часть внешней нагрузки

- распределяется на вторые боковые тела качения. Коэффициент распределения нагрузки в подшипнике с клеевым соединением ТК-200 в 1,6 раза выше, чем в стандартном подшипнике с нулевым зазором посадки ($K_{рн} = 0,72$ и $0,44$, соответственно).
8. В подшипнике 209 с клеевым соединением ТК-200, в сравнении с подшипником без полимерного слоя, из-за увеличения площади контакта нагруженных тел с дорожкой качения внутреннего кольца снизились контактные напряжения. В зоне контакта: а) центрального тела с дорожкой качения внутреннего кольца подшипника до 2,0 раз; б) первых боковых тел с дорожкой качения до 1,79 раза.
 9. Долговечность подшипника при восстановлении неподвижных соединений «вал-подшипник» адгезивом ТК-200 составила при циклическом нагружении 49,95 млн. об., что в 3,2 раза превышает расчетную (15,6 млн. об.), а при статическом нагружении – 53,04 млн. об., что в 3,4 раза превышает расчетную долговечность.
 10. По результатам проведенных исследований разработана технология восстановления неподвижных соединений «вал-подшипник» цианакрилатным клеем ТК-200. Рекомендуются восстанавливать клеем ТК-200 неподвижные соединения «вал-подшипник» с диаметральным износом до 0,1 мм. Технология восстановления внедрена в ООО «Восход» Добринского района Липецкой области. Годовой экономический эффект от внедрения новой технологии составил около 340 тыс. руб.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Кузнецов, М. М.** Модель напряженного состояния клеевого соединения типа «вал-подшипник» [Текст] / Ли Р. И., Кузнецов М. М., // Вестник МичГАУ. – 2013. – №1. – С.40-44.
2. **Кузнецов, М. М.** Восстановление неподвижных соединений подшипников качения в узлах машин современными клеями [Текст] / Ли Р. И., Бутин А. В., Кузнецов М. М., // – Труды ГОСНИТИ. М.: Изд-во ГОСНИТИ, т. 111, ч. 2, 2013. – С. 98-100.
3. **Кузнецов, М. М.** Расчет напряженного состояния клеевого соединения типа «вал-подшипник» при радиальном нагружении [Текст] / Р. И. Ли, М. М. Кузнецов, // Вестник МичГАУ. – 2013. – № 3. – С. 73-76.

В сборниках научных трудов и материалах конференции:

4. **Кузнецов, М. М.** Изготовление и исследование прочности, относительного удлинения пленок на основе цианакрилатного клея ТК-200 [Текст] / Ли Р. И., Кузнецов М.М., // Особенности технического оснащения современного с.х. производства: [сборник]. Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых 24-25 апреля 2012 г. – Орел: Изд-во ОрелГАУ, 2012 г. С.63-66.
5. **Кузнецов, М. М.** Деформационно-прочностные свойства цианакрилатного клея ТК-200 для фиксации деталей [Текст] / Ли Р. И., Кузнецов М.М., // Сборник научных трудов Международной научно-технической конферен-

- ции, 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. **Кузнецов, М. М.** Исследование деформационно-прочностных свойств цианакрилатного клея ТК-200 [Текст] / Ли Р. И., Кузнецов М.М., // Вестник ЛГТУ. №1(20). – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2012 г. С. 70-72;
 7. **Кузнецов, М. М.** Деформационно-прочностные свойства цианакрилатного адгезива ТК-200 [Текст] / Ли Р. И., Кузнецов М.М., // XVI Международная научно-производственная конференция: Инновационные пути развития АПК на современном этапе. – Белгород.: Изд-во Бел. ГСХА, 2012. С. 175.;
 8. **Кузнецов, М. М.** Перспективные полимеры и композиционные материалы на их основе для ремонта подшипниковых узлов техники [Текст] / Ли Р. И., Кузнецов М.М., Д. В. Машин, Ф. А. Кирсанов // Материалы международной научно-производственной конференции «Современные проблемы инновационного развития агроинженерии» 20-21 ноября 2012 г. в 2 частях. – Белгород.: Изд-во Бел. ГСХА, 2012. – Часть 2. - С. 77-81.
 9. **Кузнецов, М. М.** Исследование деформационно-прочностных свойств клеевых соединений адгезива ТК-200 [Текст] / Ли Р. И., Кузнецов М.М., Торужко Д.В., // Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета: В 2-х ч. Ч.1. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2012. – С. 280-281;
 10. **Кузнецов, М. М.** Цианакрилатный клей ТК-200 для восстановления неподвижных соединений типа «вал-подшипник» [Текст] / Ли Р. И., Кузнецов М. М., // Особенности технического оснащения современного с.х. производства: [сборник]. Материалы к международной научно-практической конференции 04 - 05 апреля 2013 г. – Орел: Изд-во ОрелГАУ, 2013 г. С. 269-272
 11. **Кузнецов, М. М.** Расчет клеевого соединения «вал-подшипник» при радиальном нагружении [Текст] / Мироненко А. В., Кузнецов М. М., Ли Р. И., // Особенности технического оснащения современного с.х. производства: [сборник]. Материалы к международной научно-практической конференции 04 - 05 апреля 2013 г. – Орел: Изд-во ОрелГАУ, 2013 г. С. 309-313
 12. **Кузнецов, М. М.** Расчет напряженного состояния клеевого шва в соединении типа «вал-подшипник» [Текст] / Ли Р. И., Мироненко А. В., Кузнецов М. М., // – МОЛОДЕЖЬ-НАУКА-ПРОИЗВОДСТВО: Сборник трудов областной научно-практической конференции по проблемам технических наук. – 24-25 апреля 2013 г., г. Липецк. Изд-во ЛГТУ, 2013. – С. 113-115.
 13. **Кузнецов, М. М.** Исследование полимеризации и прочности клеевых соединений цианакрилатного клея ТК-200 [Текст] / Ли Р. И., Кузнецов М. М., // – МОЛОДЕЖЬ-НАУКА-ПРОИЗВОДСТВО: Сборник трудов областной научно-практической конференции по проблемам технических наук. – 24-25 апреля 2013 г., г. Липецк. Изд-во ЛГТУ, 2013. – С. 94-96.

Отпечатано в издательско-полиграфическом центре МичГАУ
Подписано в печать 27.08.13г. Формат 60x84 1/16,
Бумага офсетная № 1. Усл.печ.л. 1,1 Тираж 100 экз. Ризограф Заказ № 16980

Издательско-полиграфический центр Мичуринского государственного аграрного университета
393760, Тамбовская обл., г. Мичуринск, ул. Интернациональная, 101, тел. +7 (47545) 5-55-12

