

*На правах рукописи*

**МАШИН Дмитрий Владимирович**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ  
ПОСАДОЧНЫХ ОТВЕРСТИЙ В КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЯХ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ КОМПОЗИЦИЕЙ  
НА ОСНОВЕ ЭЛАСТОМЕРА 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, 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Мичуринский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВПО МичГАУ)

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  
автоматизированного оборудования  
машиностроительного производства, профессор

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

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Орловский государственный  
аграрный университет»

Защита диссертации состоится 17 октября 2013 года в 12:00 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](http://www.vak.ed.gov.ru) и [www.mgau.ru](http://www.mgau.ru)

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



Ланцев В.Ю.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Корпусные детали являются наиболее дорогостоящими деталями и в значительной мере формируют затраты на ремонт техники. Они являются базисными, ресурсными деталями, определяющими долговечность всего агрегата.

Износ посадочных отверстий в корпусных деталях агрегатов трансмиссии мобильных машин вызывает изменение взаимного расположения валов с подшипниками. При этом нарушается соосность и параллельность валов, взаимное расположение поверхностей сопрягаемых деталей. В результате снижается ресурс подшипниковых узлов, зубчатых колес, агрегата, надежность машины.

Основной причиной износа посадочных отверстий под подшипники в корпусных деталях является фреттинг-коррозия. Способы восстановления посадочных отверстий полимерными материалами отличаются простотой и низкой себестоимостью, исключают явление фреттинг-коррозии и позволяют повысить долговечность корпусных деталей и подшипниковых узлов.

Перспективным направлением в повышении эффективности восстановления посадочных отверстий корпусных деталей является разработка полимерных композиционных материалов. Введение наполнителей в полимер позволяет значительно улучшить потребительские свойства материала, такие как прочность, теплопроводность и др., восстанавливать детали с большим износом, уменьшать энергоемкость технологии и снижать стоимость материала. Это создает основу для разработки высокоэффективных технологических процессов восстановления, обеспечивающих дальнейшее повышение долговечности корпусных деталей и снижение затрат на ремонт сельскохозяйственной техники.

**Степень разработанности темы.** Вопросам восстановления корпусных деталей сельскохозяйственной техники полимерными материалами посвящены труды Башкирцева В. Н., Гаджиева А. А., Гвоздева А. А., Котина А. В., Кононенко А. С., Курчаткина В. В., Ли Р. И., Мельниченко И. М., Шубина А. Г. и многих других отечественных ученых. Корпусные детали восстанавливают эпоксидными составами, анаэробными герметиками и композициями на их основе, эластомерами. Технологии восстановления посадочных отверстий эластомерами отличаются простотой, не требуют сложного оборудования и оснастки, имеют низкую себестоимость процесса.

Анализ известных технологий и полимерных материалов показал, что вопрос наполнения эластомеров, предназначенных для восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях машин, не исследован. Отсутствуют требования к наполнителям, учитывающие условия эксплуатации полимерных покрытий в корпусных деталях. Не изучен вопрос увеличения модуля упругости и уменьшения податливости наполненных эластомеров. Требуют исследования вопросы снижения энергоемкости и повышения качества полимерных покрытий при восстановлении корпусных деталей наполненными эластомерами.

Работа выполнена на кафедре «Технология обслуживания и ремонта машин и оборудования» Мичуринского государственного аграрного университета

в соответствии с планом госбюджетных научно-исследовательских работ МичГАУ на 2011...2015 годы по теме № 14 «Разработка технологий восстановления и упрочнения деталей с.х. техники и технологического оборудования по переработке и хранению с.х. продукции».

**Цель работы.** Повышение эффективности восстановления посадочных отверстий корпусных деталей сельскохозяйственной техники композицией на основе эластомера Ф-40С за счет повышения качества полимерных покрытий, увеличения их теплопроводности, повышения прочности и долговечности, меньших энергозатрат технологии, восстановления деталей с большим износом.

**Объект исследований.** Пленки и полимерные покрытия, неподвижные соединения «корпус-подшипник», выполненные композицией на основе эластомера Ф-40С.

**Предмет исследования.** Деформационно-прочностные свойства пленок, адгезионная прочность, пористость и теплопроводность покрытий композиции на основе эластомера Ф-40С, теплообразование и долговечность неподвижных соединений «корпус-подшипник», выполненных композицией на основе эластомера Ф-40С.

**Методика исследования** представлена теоретическими исследованиями на основе теории прочности и долговечности полимерных композиционных материалов (ПКМ), экспериментальными исследованиями деформационно-прочностных и адгезионных свойств, пористости и теплопроводности покрытий композиции на основе эластомера Ф-40С, теплообразования и долговечности неподвижных соединений «корпус-подшипник», выполненных композицией на основе эластомера Ф-40С. Достоверность полученных 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 полимерными композиционными материалами;
- регрессионная модель прочности композиции на основе эластомера Ф-40С, результаты экспериментальных исследований деформационно-прочностных свойств пленок, адгезионной прочности, пористости и теплопроводности покрытий композиции на основе эластомера Ф-40С, теплообразования и долговечности неподвижных соединений «корпус-подшипник», выполненных композицией на основе эластомера Ф-40С;
- технология восстановления посадочных отверстий под подшипники в корпусных деталях композицией на основе эластомера Ф-40С и технико-экономическая эффективность ее использования.

**Научная новизна.** Заключается в теоретическом обосновании снижения податливости опор качения, восстановленных наполненными эластомерами, сформулированных требованиях к наполнителям для эластомеров, предназначенных для восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях, регрессионной модели прочности композиции на основе эластомера Ф-40С, исследовании деформационно-прочностных и адгезионных свойств, теплопроводности

сти, оценке качества композиции эластомера Ф-40С, исследовании теплового баланса и долговечности подшипниковых узлов в корпусных деталях, восстановленных композицией эластомера Ф-40С.

**Практическая ценность** заключается в разработанной технологии восстановления посадочных отверстий корпусных деталей сельскохозяйственной техники композицией на основе эластомера Ф-40С.

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

- научных конференциях профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов Мичуринского государственного аграрного университета в 2011...2013 гг.;
- XV Международной научно-производственной конференции «Проблемы с.х. производства на современном этапе и пути их решения», Бел. ГСХА (г. Белгород), 2011 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 «Технология обслуживания и ремонта машин и оборудования» ФГБОУ ВПО МичГАУ в 2013 г.

**Публикации.** По результатам выполненной работы опубликовано – 11 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 145 страницах машинописного текста, содержит 44 рисунка, 8 таблиц, 4 приложения и библиографию из 121 наименования.

## **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 податливости опор качения, восстановленных эластомерами, известных технологий восстановления посадочных отверстий корпусных деталей полимерными материалами, теплового баланса подшипниковых узлов,

восстановленных полимерными материалами, сформулированы цель и задачи исследований.

Решению проблем технологии ремонта машин 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.

Корпусные детали являются наиболее дорогостоящими деталями и в значительной мере формируют затраты на ремонт техники. Они являются базисными, ресурсными деталями, определяющими долговечность всего агрегата. Износ посадочных отверстий в корпусных деталях агрегатов трансмиссии мобильных машин вызывает изменение взаимного расположения валов с подшипниками. При этом нарушается соосность и параллельность валов, взаимное расположение поверхностей сопрягаемых деталей. Перекосы осей посадочных отверстий корпусных деталей агрегатов трансмиссии приводят к перекосу колец подшипников и увеличению неравномерности нагрузки на зубьях шестерен. Перекос колец подшипников ведет к увеличению нагрузки на тела и дорожки качения, их интенсивному изнашиванию. Отклонение от параллельности осей приводит к изменению межцентрового расстояния зубчатых колес и, как следствие, к возрастанию динамических нагрузок на зубьях, что может привести к их выкрашиванию, излому, резкому сокращению ресурса.

Технология восстановления посадочных отверстий корпусных деталей герметиком бФ отличается простотой и низкой себестоимостью. После восстановления многократно увеличивается ресурс корпусных деталей и подшипников. Эффективность технологии восстановления можно повысить, если увеличить максимально допустимую толщину полимерного покрытия, компенсирующего износ. Предельная толщина покрытия из эластомера в значительной мере ограничивается значением податливости восстановленной опоры при радиальном нагружении подшипника, влияющей на смещение осей подшипника относительно оси отверстия. Для увеличения максимально допустимой толщины полимерного покрытия эластомера и обеспечения при этом необходимой податливости, следует увеличить модуль упругости материала.

Анализ литературных источников показал, что вопрос увеличения модуля упругости и уменьшения податливости эластомеров при восстановлении корпусных деталей не изучен. Необходимы теоретические и экспериментальные исследования по увеличению модуля упругости и уменьшению податливости эластомеров при восстановлении корпусных деталей

Одним из способов увеличения модуля упругости полимерных материалов является введение в полимерную матрицу дисперсных наполнителей органического и неорганического происхождения. Необходимы теоретические исследования, которые позволят сформулировать требования к наполнителям и целенаправленно выбирать их при разработке новых ПКМ на основе эластомеров, предназначенных для восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях. Представляет практический интерес разработка ПКМ на основе эластомера Ф-40С.

Теплопроводность полимерных материалов меньше чем теплопроводность черных металлов примерно в 100 раз. По этой причине теплоотвод в восстановленных подшипниковых узлах в процессе эксплуатации несколько затруднен. Теплоотвод в подшипниковых узлах, восстановленных полимерными материалами зависит от толщины полимерного слоя. Чем больше толщина полимерного слоя, тем ниже теплоотвод. Поэтому при выборе наполнителей необходимо выбирать такие, которые повысят теплопроводность ПКМ. Представляет практический интерес исследование теплопроводности ПКМ на основе эластомера Ф-40С.

Для проверки корректности, полученных в работе теоретических положений, необходимо исследовать ПКМ на основе эластомера Ф-40С и разработать технологию восстановления посадочных отверстий корпусных деталей.

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

- исследовать теоретические аспекты снижения податливости опор качения при восстановлении посадочных отверстий наполненными эластомерами;
- разработать теоретические предпосылки повышения эффективности эластомеров для восстановления корпусных деталей при введении наполнителей;
- исследовать деформационно-прочностные свойства пленок полимерной композиции на основе эластомера Ф-40С;
- исследовать адгезию полимерной композиции на основе эластомера Ф-40С;
- исследовать теплопроводность полимерной композиции на основе эластомера Ф-40С;
- исследовать пористость пленок полимерной композиции на основе эластомера Ф-40С;
- исследовать долговечность и тепловой баланс неподвижных соединений, восстановленных полимерной композицией на основе эластомера Ф-40С;
- разработать технологию восстановления посадочных отверстий корпусных деталей полимерной композиции на основе эластомера Ф-40С и оценить ее технико-экономическую эффективность.

**Во второй главе** «Теоретические предпосылки повышения эффективности восстановления корпусных деталей полимерными композиционными материалами» рассмотрены теоретические аспекты снижения податливости опор качения при восстановлении посадочных отверстий эластомерами и причины повышения эффективности эластомеров при введении дисперсных металлических порошков.

**Исследования коэффициента податливости опор, восстановленных полимерными материалами.** С увеличением толщины полимерного покрытия возрастает деформация наружного кольца при нагружении и, соответственно, смещение вала относительно отверстия корпусной детали. Особенно эта проблема актуальна для эластомеров, обладающих высокой податливостью. Следует отметить, что предельная толщина покрытия из эластомера в значительной мере ограничивается значением податливости восстановленной опоры при ра-

диальном нагружении подшипника. Рассмотрим связь податливости полимерного материала с его деформационно-прочностными характеристиками.

Центральное тело качения в подшипнике является наиболее нагруженным. Поэтому деформация наружного кольца подшипника напротив центрального тела качения при радиальном нагружении подшипника будет максимальной. Деформацию можно рассчитать по формуле Курчаткина В. В.

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

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,

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EJ}}, \quad (2)$$

где  $k$  – погонный коэффициент постели,

$$k = k_n b, \quad (3)$$

где  $k_n$  – коэффициент податливости упругого основания,  $\text{Н/м}^3$ ;  $b$  – ширина балки, м.

Коэффициент податливости  $k_n$  в соответствии с формулой Винклера

$$k_n = \frac{P}{S}, \quad (4)$$

где  $P$  – давление на поверхности упругого основания;  $S$  – прогиб основания.

Прогиб полимерного покрытия под давлением  $P$  можно определить по известной формуле

$$S = \frac{P(1 + \mu_n)(1 - 2\mu_n)h_n}{(1 - \mu_n)E_n}, \quad (5)$$

где  $\mu_n$  и  $E_n$  – осредненные коэффициент Пуассона и модуль упругости материала полимерного покрытия в пределах сжимаемой толщины  $h_n$ , соответственно.

Подставим (5) в (4) получим

$$k_n = \frac{(1 - \mu_n)E_n}{(1 + \mu_n)(1 - 2\mu_n)h_n} \quad (6)$$

Коэффициент податливости  $k_n$  имеет прямую пропорциональную зависимость от модуля упругости полимера. Чем больше модуль упругости  $E_n$ , тем больше значение коэффициента податливости  $k_n$  и меньше прогиб полимерного покрытия  $S$ . Поэтому, чтобы увеличить допускаемую толщину полимерного покрытия эластомера и обеспечить при этом прогиб полимерного покрытия в допускаемых пределах, необходимо увеличить модуль упругости эластомера.

Формула (6) не учитывает жесткость наружного кольца подшипника, которая зависит от его типоразмера.



В нашей работе предложена экспериментально-расчетная методика определения коэффициента постели и деформации наружного кольца подшипника при радиальном нагружении с учетом типоразмера подшипника.

Первоначально определяют цилиндрическую жесткость наружного кольца подшипника по известной формуле

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}, \quad (7)$$

где  $h$  – высота поперечного сечения балки эквивалентного поперечному сечению наружного кольца подшипника;  $\mu$  – коэффициент Пуассона стали.

Затем рассчитывают величину  $a$  по известной формуле

$$a = \sqrt[3]{\frac{E_n}{2D(1-\mu_n^2)}}, \quad (8)$$

Далее экспериментально определяют радиус отпечатка  $R$  при контакте нагруженного шарика с беговой дорожкой наружного кольца подшипника по методике проф. Ли Р. И.

Из таблицы 1, по произведению  $aR$  определяют значение коэффициента  $\eta$

Таблица 1 – Значения коэффициента  $\eta$  от величины  $aR$  [Горб А. М.]

| Величина | Значение |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $aR$     | 0,05     | 0,1   | 0,2   | 0,3   | 0,4   | 0,6   | 0,8   | 1,0   | 1,2   | 1,6   | 2,0   |
| $\eta$   | 0,091    | 0,147 | 0,220 | 0,275 | 0,313 | 0,352 | 0,367 | 0,364 | 0,353 | 0,309 | 0,263 |

Затем рассчитывают значения  $\dot{a}_0$  и  $k_n$  по известным формулам

$$a_0 = 1,91\eta \frac{h_n}{R} \sqrt[3]{\frac{E(1-\mu_n^2)}{E_n(1-\mu^2)}}, \quad k_n = \frac{Eh^3}{R^4 10^{a_0}} \quad (9)$$

В заключении по формуле (1) рассчитывают деформацию наружного кольца при радиальной нагружении.

**Модуль упругости наполненных эластомеров.** Так как модуль упругости металлической частицы наполнителя многократно выше модуля упругости полимерной матрицы, частица не деформируется вместе со слоями окружающей жидкости (полимера) и препятствует ее течению, повышая ее вязкость. Повышению сопротивления течению и вязкости способствуют адсорбированные на наполнителе макромолекулы и коагуляционная сетка наполнителя. Вязкость суспензии повышают столкновения частиц при течении и затраты энергии на их взаимное трение.

Вязкость суспензии (полимерной композиции) можно определить по уравнению Эйнштейна

$$\eta = \eta_1(1 + k_E \varphi_2), \quad (10)$$

где  $\eta$  и  $\eta_1$  – вязкости суспензии и жидкой фазы;  $k_E$  – коэффициент Эйнштейна,  $\varphi_2$  – объемная доля твердых частиц.

Уравнение Эйнштейна удовлетворительно оценивает вязкость суспензии с очень низкой концентрацией твердых частиц.

Уравнение Муни достаточно хорошо описывает вязкость различных суспензий в широком диапазоне концентраций наполнителя

$$\ln\left(\frac{\eta}{\eta_1}\right) = \frac{k_E \varphi_2}{1 - \frac{\varphi_2}{\varphi_{\max}}}, \quad (11)$$

где  $\varphi_2$  – объемная доля жидкой фазы;  $\varphi_{\max}$  – максимальный коэффициент упаковки твердых частиц.

Тело при течении испытывает сдвиговую деформацию, вязкотекучее и высокоэластическое состояния полимера очень сходны, поэтому для эластомеров справедливо следующее равенство

$$\frac{\eta}{\eta_1} = \frac{G}{G_1}, \quad (12)$$

где  $G$  и  $G_1$  – модули сдвига полимерной композиции и полимерной матрицы соответственно.

Подставив (12) в (11), после преобразования получим формулу для определения модуля жесткости (сдвига) наполненных эластомеров

$$G = G_1 e^{\frac{k_E \varphi_2}{(1 - \frac{\varphi_2}{\varphi_{\max}})}} \quad (13)$$

Примем ПКМ на основе эластомера изотропным. Так как толщина полимерного слоя не превышает 0,15 мм, справедливо допущение, что изменение деформации при нагружении носит линейный характер. При таких допущениях выполняется соотношение между модулями сдвига  $G$  и упругости  $E$

$$G = \frac{E}{2 + 2\mu} \quad (14)$$

Подставим выражение (14) в (13) и получим

$$\frac{E_{нк}}{2 + 2\mu_{нк}} = \frac{E_{нм}}{2 + 2\mu_{нм}} e^{\frac{k_E \varphi_2}{(1 - \frac{\varphi_2}{\varphi_{\max}})}}, \quad (15)$$

где  $E_{нк}$  и  $E_{нм}$  – модули упругости ПКМ и полимерной матрицы;  $\mu_{нм}$  – коэффициент Пуассона полимерной матрицы.

В первом приближении, с достаточной достоверностью, можно считать, что коэффициенты Пуассона эластомера и композиции на его основе равны. Тогда формула примет вид

$$E_{нк} \approx E_{нм} e^{\frac{k_E \varphi_2}{(1 - \frac{\varphi_2}{\varphi_{\max}})}} \quad (16)$$

Формула (16) учитывает деформационно-прочностные свойства полимерной матрицы (модуль упругости эластомера), форму и удельную поверхность частиц наполнителя, а также их концентрацию в композиции.

**Повышение прочности и долговечности эластомеров при наполнении высокодисперсными твердыми частицами.**

Прочность упругоизотропного твердого тела можно рассчитать по формуле Гриффита, преобразованной Орованом и Ирвином

$$\sigma_F = Y\sqrt{2E\gamma_F / c} \quad (17)$$

где  $\sigma_F$  – разрушающее напряжение;  $Y$  – геометрическая константа, зависящая от формы и размеров образца;  $\gamma_F$  – удельная поверхностная энергия разрушения;  $c$  – длина трещины.

Из формулы (17) следует, что прочность полимерного материала зависит от размера трещины  $c$ , модуля упругости  $E$  и удельной поверхностной энергии разрушения  $\gamma_F$ .

Механизм упрочнения эластомеров имеет особенности и описывается двумя гипотезами: релаксационной Александрова и Лазуркина и ориентационной Догадкина. Высокодисперсные частицы создают в объеме эластомера цепочечные структуры. Наполненная система состоит из первичной структуры, которую образуют частицы наполнителя, и вторичной, создаваемой макромолекулами полимера, ориентированными на поверхности этих частиц и образующими поверхностный слой с измененными свойствами. Образованные при смешении хаотические связи каучук-наполнитель под напряжением деформируются и разрываются. Затем они восстанавливаются в новых положениях, закрепляя на поверхности наполнителя макромолекулы каучука, которые частично ориентированны в направлении действия напряжений. По этой причине происходит выравнивание местных перенапряжений и увеличение прочности материала.

Если адгезионная связь каучук-наполнитель не превышает поверхностную энергию матрицы, в композиции при деформации одновременно образуются многочисленные очаги разрушения, что сопровождается повышенным рассеянием энергии. Разрушение происходит скачкообразно от одной поверхности раздела каучук-наполнитель к другой по зигзагообразной линии, что увеличивает путь и работу разрушения  $\gamma_F$  и соответственно прочность. По Курчаткину В. В. увеличение удельной работы разрушения повышает стойкость материала к циклическим нагрузкам, т.е. повышает его долговечность.

Поэтому в эластомерах, наполненных высокодисперсными частицами, при деформации происходит выравнивание напряжений и удлинение пути разрушения, соответственно увеличение работы разрушения, прочности и долговечности.

Прочность увеличивается также из-за повышенного механического гистерезиса наполненных эластомеров, вследствие выделяющейся энергией при разрыве физических связей между наполнителем и каучуком, снижения подвижности макромолекул у поверхности наполнителя, разрушения его агломератов частиц и цепочечных структур. Из-за повышенного механического гистерезиса степень релаксации напряжения наполненных эластомеров в области больших деформаций перед вершиной разрастающейся трещины всегда больше, чем в не наполненных.

Наличие на поверхности наполнителя слоя полимера с пониженной подвижностью повышает модуль упругости. Чем больше удельная поверхность частиц наполнителя, тем выше доля полимера с пониженной подвижностью.

Поэтому для упрочнения эластомеров следует использовать высокодисперсные наполнители.

**Обоснование выбора наполнителей для эластомеров, предназначенных для восстановления корпусных деталей.** При разработке технологии восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях определяют допустимую толщину полимерного покрытия, обеспечивающую высокую долговечность восстановленного соединения. Чем она больше, тем эффективней материал, т.к. он позволяет восстанавливать корпусные детали с большим износом. Однако с увеличением толщины полимерного покрытия возникают проблемы.

С увеличением толщины полимерного покрытия возрастает деформация наружного кольца при нагружении и, соответственно, смещение вала относительно отверстия корпусной детали. Полимеры являются теплоизоляторами. Коэффициент теплопроводности чугуна составляет 56, а натурального каучука 0,042 Вт/м\*К. С увеличением толщины полимерного покрытия теплоотвод в подшипнике уменьшается, ухудшаются условия работы, повышается коэффициент трения и износ деталей. Покрытие из растворов эластомеров наносится послойно. Каждый слой покрытия перед нанесением последующего просушивается. Однако при последующей термической обработке покрытия, в последнем возникает пористость из-за испарения паров остатков растворителя. Чем больше толщина покрытия, тем больше пористость и дефектность покрытия.

Исходя из вышеизложенного, сформулированы требования к наполнителям растворов эластомеров, которые должны обеспечить следующие условия:

- увеличение прочности и долговечности ПКМ по сравнению с не наполненным эластомером, что позволит восстанавливать детали с большим износом;
- увеличение модуля упругости ПКМ, что обеспечит допустимую податливость опор качения при увеличенной толщине полимерного покрытия;
- увеличение теплопроводности ПКМ, что позволит обеспечить теплоотвод, создающий нормальные условия эксплуатации подшипникового узла;
- ускорение отверждения наносимых слоев, уменьшение температуры и времени термической обработки, снижение пористости покрытия, по сравнению с не наполненным эластомером.

Алюминиевый сплав имеет высокую вязкость разрушения  $1,4 \cdot 10^5$  Дж/м<sup>2</sup>. Поэтому наполнение эластомера высокодисперсным порошком алюминия, позволит повысить удельную поверхностную энергию разрушения  $\gamma_F$ , прочность и долговечность ПКМ при циклическом нагружении. Наполнение эластомера высокодисперсным порошком алюминия позволит повысить модуль упругости ПКМ и уменьшить податливость восстановленных опор качения. Ввод металлических частиц в полимерную матрицу многократно увеличивает теплопроводность композиции. Теплопроводность каучука 0,042, а алюминия 230 Вт/м\*К., поэтому ввод частиц наполнителя повысит теплопроводность композиции. В малых концентрациях частицы наполнителя являются искусственным зародышем структурообразования. Поэтому для снижения температуры и сокращения времени термической обработки, уменьшения пористости покры-

тий ПКМ рекомендуется вводить в растворы эластомеров высокодисперсные порошки меди или ее сплавов.

**В третьей главе** «Методика экспериментальных исследований» приведены общая методика исследований и частные методики исследования деформационно-прочностных свойств пленок, адгезии, теплопроводности и пористости покрытий ПКМ на основе эластомера Ф-40С, теплообразования и долговечности неподвижных соединений «корпус-подшипник», выполненных ПКМ на основе эластомера Ф-40С.

Деформационно-прочностные свойства пленок ПКМ на основе эластомера Ф-40С 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".

Для получения оптимального состава ПКМ на основе эластомера Ф-40С проведен активный эксперимент по композиционному плану  $B_2$ . В качестве функции отклика  $Y$  приняли разрушающее напряжение  $\sigma$ , МПа пленок ПКМ на основе эластомера Ф-40С, а независимыми факторами:  $X_1$  и  $X_2$  – концентрацию наполнителей: алюминиевой пудры ПАП-1 (ГОСТ 5494-95) и бронзового порошка БПП-1 (ТУ 48-21-150-72). Исследование модуля упругости пленок проводили в соответствии с ГОСТ 9550-81.

При исследованиях коэффициента Кирхгофа и коэффициента податливости использовали шарик диаметром  $D = 12,7$  мм и пластину из стали ШХ-15 размерами  $100 \times 25 \times 4,92$  мм с подложкой из композиции эластомера Ф-40С. Размеры пластины обеспечивают жесткость соответствующую моменту инерции поперечного сечения наружного кольца подшипника 209. Пластину устанавливали полимерным покрытием вниз на поверочную плиту 2-1-250 $\times$ 250 ГОСТ 10905-75, установленную на опорную раму 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. Одновременно с нагружением шарика, измеряли деформацию пластины измерительной головкой 1МИГ с ценой деления 0,001 мм, установленной на штативе.

Адгезионные свойства композиции оценивали прочностью связи с металлом при отслаивании образцов (ГОСТ 21981-76). Образцами служили пластины  $100 \times 25 \times 3$  мм из стали 45, с шероховатостью поверхности  $Ra 0,63$ , на которые кистью №5 наносили послойно композицию. Затем накладывали железную сетку №07 (ГОСТ 3826-82). На сетку послойно наносили композицию на основе эластомера Ф-40С.

Теплопроводность исследовали по методике Бочарова А. В. Установка представляла собой электронагреватель, передающий тепло соединению «вал-кольцо подшипника». Электронагреватель передавал тепло валу, через который осуществлялся постоянный тепловой поток полимерному покрытию и далее кольцу подшипника. Для определения перепада температуры измеряли температуру вала и кольца подшипника инфракрасным пирометром Fluke-62.

Дефектность покрытий оценивали по ГОСТ 9.407-84. Образцами являлись пленки эластомера Ф-40С и композиции на его основе. Дефектность об-

разцов оценивали по площади разрушенного покрытия, по размерам (диаметр пузырьков) и количеству пузырьков на единицу площади, используя микроскопом МПБ-2.

Исследование теплообразования и долговечности неподвижных соединений «корпус-подшипник», выполненных ПКМ на основе эластомера Ф-40С проводили на вибростенде. Значения циклической радиальной нагрузки составляли  $P = 9,9; 15,8$  и  $20,0$  кН. Для определения перепада температуры измеряли температуру наружного кольца подшипника и втулки корпуса инфракрасным пирометром Fluke-62. При исследовании долговечности неподвижных соединений нагрузка на подшипники 209 составляла 20 кН. 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 пленок, адгезионной прочности, пористости и теплопроводности покрытий ПКМ на основе эластомера Ф-40С, теплообразования и долговечности неподвижных соединений «корпус-подшипник», выполненных композицией.

**Исследование деформационно-прочностных свойств пленок ПКМ на основе эластомера Ф-40С.** Исследованиями установлено, что пленки композиции имеют прочность на 9 % выше, а деформацию на 8 % ниже в сравнении с не наполненным Ф-40С. Температура термической обработки композиции снизилась на  $20^{\circ}\text{C}$ , а время на 0,5 ч в сравнении с не наполненным Ф-40С.

**Исследование и оптимизация состава полимерной композиции на основе эластомера Ф-40С.** В результате реализации активного эксперимента получена регрессионная модель, представленная на рисунке 1.

Уравнение регрессии в натуральных единицах имеет вид

$$Y = 5,68495 + 0,6778X_1 + 1,961X_2 + 0,012X_1X_2 - 0,02155X_1^2 - 0,605X_2^2 \quad (18)$$

На основе анализа двумерного сечения определена область оптимума критерия оптимизации и выбран оптимальный состав композиции на основе эластомера Ф-40С: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч.; алюминиевая пудра ПАП-1 – 16 масс.ч.; бронзовый порошок БПП-1 – 1,8 масс.ч. Пленки композиции при оптимальном составе, имеют максимальную прочность 12,93 МПа.

**Исследование модуля упругости полимерной композиции на основе эластомера Ф-40С.** Эксперимент показал, что модуль упругости ПКМ на основе эластомера Ф-40С составляет 1111,1 МПа, что на 25 % больше модуля упругости эластомера Ф-40 и на 11 % больше модуля упругости эластомера Ф-40С (рисунок 2).

**Исследование коэффициента Кирхгофа и коэффициента податливости соединений из композиции эластомера Ф-40С.** Исследованиями установлено, что в подшипниковом соединении с покрытием из ПКМ на основе эластомера Ф-40С коэффициент Кирхгофа увеличивается по сравнению со стандартным подшипником (парой «сталь-сталь») от 3,64 до 9,58 раз в зависимости от толщины полимерного слоя. По этой причине пятно контакта соприкасающихся тел увеличивается от 1,11 до 1,86 раза по сравнению с парой «сталь-сталь». С увеличением толщины полимерного покрытия коэффициент податли-

ности упругого основания уменьшается по линейной зависимости от 65,72 до 45,39 Н/мм<sup>2</sup>. Введение дисперсных металлических порошков повысило коэффициент податливости упругого основания в композиции по сравнению с не наполненным эластомером Ф-40С от 1,29 до 1,37 раза.

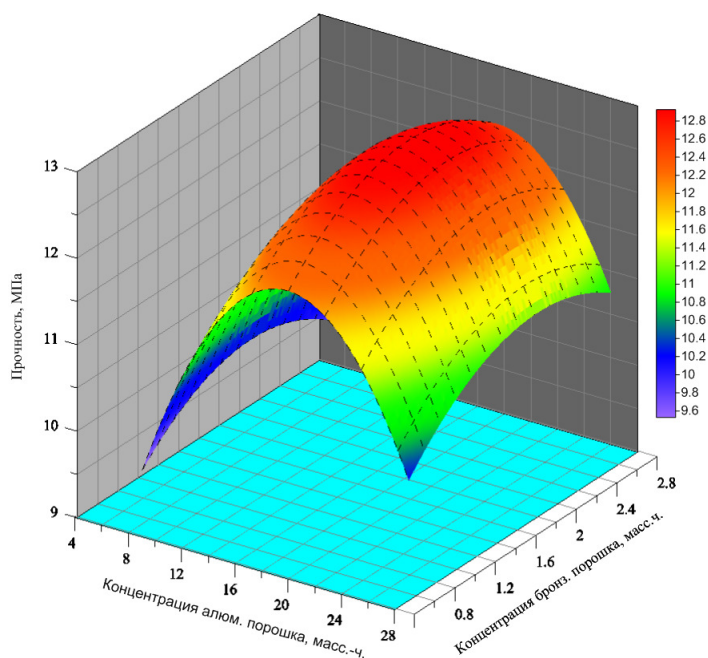


Рисунок 1 – Зависимость прочности пленок ПКМ на основе эластомера Ф-40С от концентрации алюминиевого пудры ПАП-1 и бронзового порошка БПП-1

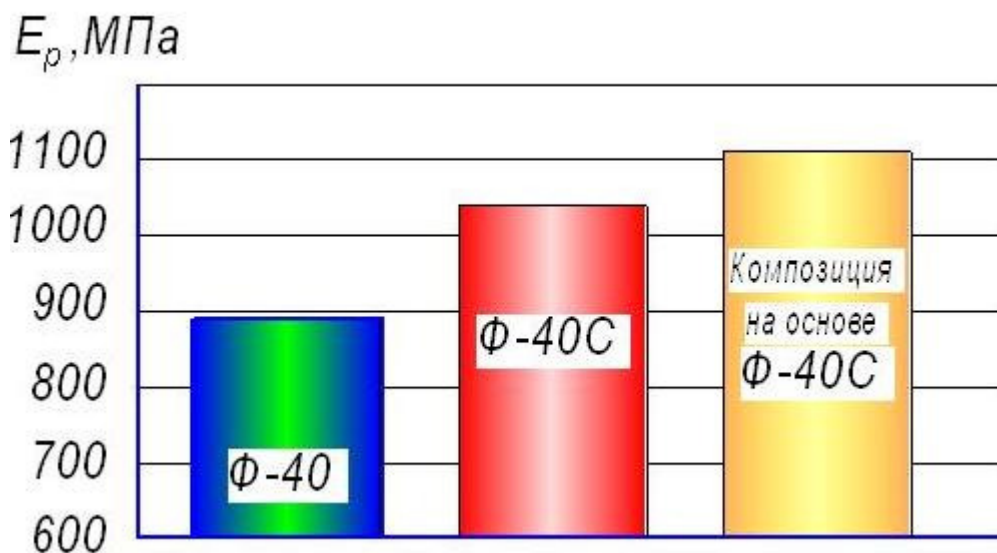


Рисунок 2 – Модуль упругости  $E_p$  эластомеров

**Исследование адгезии полимерной композиции на основе эластомера Ф-40С.** Эксперимент показал, что прочность связи с металлом при отслаивании ПКМ на основе эластомера Ф-40С составляет 11292 Н/м. Это на 10% превышает аналогичный показатель эластомера Ф-40С и в 3,42 раза превышает прочность эластомера Ф-40.

**Исследование теплопроводности полимерной композиции на основе эластомера Ф-40С.** Исследования показали, что после ввода дисперсных металлических наполнителей коэффициент теплопроводности ПКМ на основе эластомера Ф-40С составил 19,97 Вт/м\*К, что в 73,96 раза больше коэффициента теплопроводности не наполненного эластомера Ф-40С ( $\lambda_{п} = 0,27$  Вт/м\*К).

**Исследование пористости пленок полимерной композиции на основе эластомера Ф-40С.** Исследованиями установлено, что площадь разрушенного покрытия эластомера Ф-40С составляет 10,5 %, в композиции на основе эластомера аналогичный показатель снизился до 4,66 %. Площадь разрушенного покрытия уменьшилась при введении дисперсных металлических наполнителей в 2,25 раза. Измерение размера пор показало, что средний диаметр пор в покрытиях эластомера Ф-40С составляет 0,4...0,5 мм, в покрытиях композиции Ф-40С – 0,2...0,3 мм. Размер пор уменьшился до 2,5 раз. Концентрация пор снизилась на 24 %.

**Исследование долговечности и теплового баланса неподвижных соединений, восстановленных полимерной композицией на основе эластомера Ф-40С.** Исследования показали, что введение дисперсных металлических наполнителей увеличивает выносливость и соответственно долговечность восстановленных неподвижных соединений при циклических нагрузках. Максимальная допустимая толщина клеевого шва эластомера Ф-40С  $h = 0,1$  мм, а композиции на его основе  $h = 0,125$  мм (рисунок 3). Композицией на основе эластомера Ф-40С следует восстанавливать изношенные посадочные отверстия под подшипники с диаметральным износом до 0,25 мм.

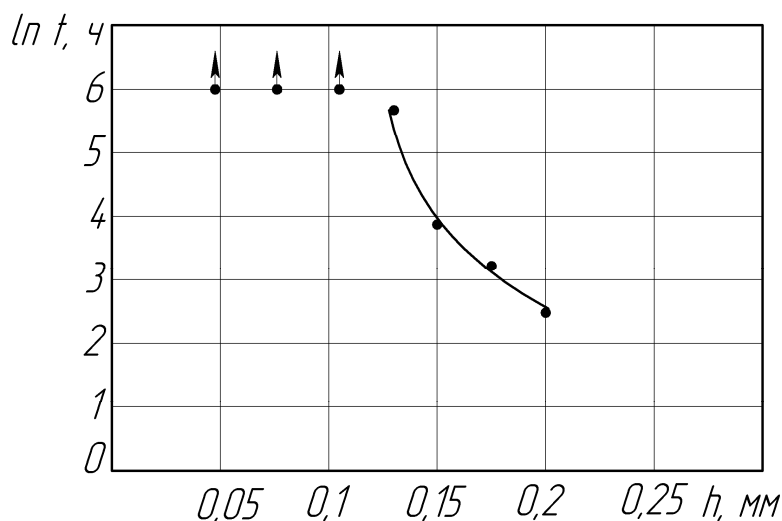


Рисунок 3 – Зависимость долговечности  $t$  неподвижных соединений подшипников 209 от толщины полимерного покрытия композиции на основе эластомера Ф-40С при радиальной нагрузке 20 кН

С увеличением радиальной циклической нагрузки температура наружного кольца подшипникового узла, восстановленного эластомером Ф-40С, повышается и составляет 39, 43 и 48 °С при нагрузках 9,9; 15,8 и 20,0 кН соответственно. Температура втулки подшипникового узла также с увеличением нагрузки повышается и составляет 47, 56 и 71 °С при нагрузках 9,9; 15,8 и 20,0 кН соответственно.



Температура наружного кольца подшипникового узла восстановленного композицией на основе эластомера Ф-40С составляет 36, 39 и 42 °С при нагрузках 9,9; 15,8 и 20,0 кН соответственно, что на 8,3; 10,2 и 14,3% меньше чем у не наполненного эластомера. Температура втулки подшипникового узла составляет 45, 50 и 56 °С при нагрузках 9,9; 15,8 и 20,0 кН соответственно, что на 4,4; 12 и 26,8% меньше чем у не наполненного эластомера. При наполнении эластомера Ф-40С дисперсными металлическими порошками значительно снижается теплообразование в подшипниковом узле. Температура деталей подшипникового узла, восстановленного композицией на основе эластомера Ф-40С ниже до 15°С по сравнению с ненаполненным материалом.

**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 посадочных отверстий под подшипники в корпусных деталях композицией на основе эластомера Ф-40С, которая содержит следующие операции: очистка посадочных отверстий; измерение посадочных отверстий для определения износа; обезжиривание посадочных отверстий; приготовление композиции; нанесение композиции на посадочные места подшипников в отверстиях корпусной детали; термическая обработка нанесенных полимерных покрытий; контроль качества полимерных покрытий в корпусной детали.

Разработанная технология восстановления корпусных деталей композицией на основе эластомера Ф-40С внедрена в ОАО «Подъем» Мичуринского района Тамбовской области. Для оценки надежности восстановленных неподвижных соединений подшипников 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. Годовой экономический эффект от внедрения технологии восстановления в ОАО «Подъем» Мичуринского района Тамбовской области составил около 420 тыс. руб.

Результаты исследований используются в учебном процессе ФГОУ ВПО МичГАУ при изучении дисциплин «Технология ремонта машин» и «Монтаж, эксплуатация и ремонт технологического оборудования».

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

- 1) Чтобы увеличить предельно допускаемую толщину полимерного покрытия эластомера при восстановлении и обеспечить при этом смещение оси вала относительно оси посадочного отверстия корпусной детали в допускаемых пределах, следует увеличить модуль упругости эластомера за счет введения высокодисперсных металлических наполнителей.
- 2) Предложена экспериментально-расчетная методика определения коэффициента постели и деформации наружного кольца подшипника при радиальном нагружении. Получена формула (16) для расчета модуля упругости наполненного эластомера.
- 3) Для увеличения прочности, долговечности и теплопроводности ПКМ на основе эластомеров необходимо использовать высокодисперсный алюминиевый порошок. Для снижения температуры и сокращения времени термической обра-

- ботки, уменьшения пористости покрытий ПКМ рекомендуется вводить в растворы эластомеров высокодисперсные порошки меди или ее сплавов.
- 4) Введение дисперсных порошков алюминия и бронзы в эластомер увеличивает прочность на 9 %, а деформацию уменьшает на 8 % в сравнении с не наполненным Ф-40С. Температура термической обработки композиции уменьшилась на 20<sup>0</sup>С, а время на 0,5 ч. Оптимальный режим термической обработки композиции эластомера Ф-40С составляет 140<sup>0</sup>С в течение 2,5 ч .
  - 5) Получена регрессионная модель прочности композиции эластомера Ф-40С и определен оптимальный состав композиции: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч., алюминиевый порошок ПАП-1 – 16 масс-ч. и бронзовый порошок БПП-1 – 1,8 масс-ч.
  - 6) При введении дисперсных металлических наполнителей модуль упругости композиции увеличивается на 11%, а адгезионные свойства на 10%, по сравнению с не наполненным материалом.
  - 7) В соединении с покрытием из композиции эластомера Ф-40С зависимости от толщины полимерного слоя коэффициент Кирхгофа увеличивается от 3,64 до 9,58 раз, а пятно контакта соприкасающихся тел увеличивается от 1,11 до 1,86 раза по сравнению с соединением «сталь-сталь».
  - 8) Введение дисперсных металлических порошков:
    - снижает податливость опор, восстановленных композицией по сравнению с не наполненным эластомером Ф-40С от 1,29 до 1,37 раз;
    - увеличивает коэффициент теплопроводности композиции на основе эластомера Ф-40С до  $\lambda_k = 19,97 \frac{Вт}{м \cdot К}$ , что в 73,96 раза превышает коэффициент теплопроводности не наполненного эластомера Ф-40С;
    - повышает качество полимерных покрытий: размер пор уменьшается до 2,5 раз, концентрация пор снижается на 24 %, площадь разрушенного покрытия уменьшается до 2,25 раза;
    - снижает теплообразование в подшипниковом узле. Температура деталей подшипникового узла, восстановленного композицией на основе эластомера Ф-40С ниже до 15<sup>0</sup>С по сравнению с ненаполненным материалом.
  - 9) На основе результатов исследований разработана технология восстановления посадочных отверстий под подшипники в корпусных деталях композицией на основе эластомера Ф-40С. Рекомендуется восстанавливать изношенные посадочные отверстия с диаметральной износом до 0,25 мм. Технология восстановления внедрена в ОАО «Подъем» Мичуринского района Тамбовской области. Годовой экономический эффект от внедрения новой технологии составил около 420 тыс. руб.

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

**В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. **Машин, Д. В.** Повышение эффективности восстановления посадочных отверстий корпусных деталей сельскохозяйственной техники при модификации эластомеров [Текст] / Ли Р. И., Машин Д. В., Кирсанов Ф. А., Колесников А. А., // – Труды ГОСНИТИ. М.: Изд-во ГОСНИТИ, т. 111, ч. 2, 2013. – С. 134-136.
2. **Машин, Д. В.** Теоретические аспекты повышения эффективности восстановления корпусных деталей сельскохозяйственной техники композициями на основе эластомеров [Текст] / Ли Р. И., Машин Д. В., // Вестник МичГАУ. – 2013. – № 1. – С. 53-55.

3. **Машин, Д. В.** Полимерная композиция на основе эластомера Ф-40 для восстановления корпусных деталей автотракторной техники [Текст] / Р. И. Ли, Д. В. Машин, // Вестник МичГАУ. – 2013. – № 3. – С. 66-69.  
**В сборниках научных трудов и материалах конференции:**
4. **Машин, Д. В.** Перспективные способы нанесения полимерных покрытий на посадочные места подшипников в деталях типа «вал» [Текст] / Ли Р. И., Псарев Д. Н., Машин Д. В., // XV Международная научно-производственная конференция: Проблемы с.х. производства на современном этапе и пути их решения. – Белгород.: Изд-во Бел. ГСХА, 2011. С. 209.
5. **Машин, Д. В.** 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.
6. **Машин, Д. В.** Исследование деформационно-прочностных свойств композиции на основе эластомера Ф-40 [Текст] / Ли Р. И., Машин Д. В., Колесников А. А., Сафонов В. Н., // 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. 86-88.
7. **Машин, Д. В.** Теоретические аспекты повышения эффективности восстановления корпусных деталей сельскохозяйственной техники при модификации эластомеров [Текст] / Ли Р. И., Машин Д. В., // 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. 89-92.
8. **Машин, Д. В.** Податливость опор качения восстановленных полимерными материалами [Текст] / Ли Р. И., Машин Д. В., Мироненко А. В. // 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. 93-95.
9. **Машин, Д. В.** Теоретические аспекты снижения податливости опор качения при восстановлении посадочных отверстий эластомерами [Текст] / Машин Д. В., 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. 314-318.
10. **Машин, Д. В.** Новый полимерный композиционный материал для восстановления корпусных деталей автотракторной техники [Текст] / Машин Д. В., 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. 319-322.
11. **Машин, Д. В.** Новый полимерный композиционный материал на основе эластомера Ф-40С [Текст] / Ли Р. И., Машин Д. В. // – 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. 97-99.

Отпечатано в издательско-полиграфическом центре МичГАУ

Подписано в печать 27.08.13г. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Бумага офсетная № 1. Усл.печ.л. 1,1 Тираж 100 экз. Ризограф Заказ № 16979

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

