

На правах рукописи

КОНАКОВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОСАДОЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВАЛОВ  
КОМБИНИРОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С  
НАНЕСЕНИЕМ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ**

Специальность 05.20.03 – Технологии и средства технического  
обслуживания в сельском хозяйстве

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Саранск 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева»

**Научный руководитель:** доктор технических наук профессор  
**Котин Александр Владимирович**

**Официальные оппоненты:** **Сайфуллин Ринат Назирович,**  
доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой технологии  
металлов и ремонта машин ФГБОУ ВПО  
«Башкирский государственный  
аграрный университет»

**Денисов Вячеслав Александрович,**  
кандидат технических наук, заместитель  
начальника научно-производственного  
отдела «Технологии упрочнения и  
восстановления деталей» ФГБНУ ГОСНИ-  
ТИ

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВПО «Ульяновская государственная  
сельскохозяйственная академия  
им. П.А. Столыпина»

Защита состоится 25 декабря 2014 года в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.117.06 при ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева» по адресу: 430904, г. Саранск, п. Ялга, ул. Российская, д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им М.М. Бахтина ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева» и на сайте [www.mrsu.ru/ru/diss/diss.php?ELEMENT\\_ID=31464](http://www.mrsu.ru/ru/diss/diss.php?ELEMENT_ID=31464).

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2014 г. и размещен на официальном сайте Минобрнауки РФ <http://vak2.ed.gov.ru>.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

С.А. Величко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В настоящее время одной из острейших проблем ремонтного производства является отсутствие высокоэффективных, но в тоже время простых в реализации технологических процессов восстановления посадочных поверхностей валов и осей механизмов машин. Существующие несложные и недорогие технологии, к которым можно отнести сварочно-наплавочные, восстановление пластическим деформированием, полимерными материалами как правило не позволяют обеспечить необходимый ресурс восстановленной детали, а сложные в реализации и дорогостоящие технологии: плазменная и лазерная наплавки, приварка стальной ленты и другие значительно повышают себестоимость продукции, в первую очередь из-за значительных дополнительных капитальных вложений и, как правило, не рентабельны при небольшой программе ремонта.

Решение данной проблемы видится в комбинировании первой группы технологических процессов с получением многослойных покрытий с заданными гарантированными физико-механическими, реологическими и триботехническими свойствами, а также в обеспечении необходимой размерной и геометрической точности восстанавливаемых соединений деталей. Одним из предпочтительных вариантов является получение комбинированного восстановительного покрытия на основе использования электромеханической обработки (ЭМО) и современных полимерных композиционных материалов.

Однако реализация данного подхода требует дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

**Степень разработанности темы.** В настоящее время при восстановлении деталей наиболее широко в ремонтном производстве применяются электродуговые методы, гальванические способы, напыление материалов, электроконтактные способы восстановления: припекание порошков, стальных лент, проволоки, нанесение полимерных композиций и др.

Фундаментальные теоретические и практические исследования по разработке прогрессивных технологических процессов восстановления изношенных деталей выполнены советскими и российскими учеными: Ф.Х. Бурумкуловым, Д.Г. Вадивасовым, Е.Л. Воловиком, В.А. Денисовым, А.В. Дехтеринским, Н.Н. Дорожкиным, В.И. Казарцевым, В.М. Кряжковым, И.С. Левицким, И.И. Луневским, В.А. Наливкиным, Ю.Н. Петровым, А.В. Поляченко, Р.Н. Сайфулиным, И.Е. Ульманом, В.А. Шадричевым и другими.

Перспективным направлением является разработка технологий ремонта на основе комбинирования различных способов восстановления деталей. При этом возможно исключить недостатки одних способов за счет достоинств других. Как пример, использование тонкослойных полимерных покрытий по заранее подготовленной металлической подложке, образованной общеизвестными и широко распространенными методами (наплавка, металлизация, электро-механическая обработка, электроискровая обработка и т.д.). Однако разработка и достаточно быстрое внедрение таких технологий в производство требует серьез-

ной научной проработки с использованием современных методов математического моделирования.

**Целью исследования** является разработка типового технологического процесса восстановления посадочных поверхностей валов механизмов машин под подшипники качения комбинированием ЭМО с нанесением полимерных покрытий.

**Объект исследования** – технологический процесс восстановления изношенных посадочных поверхностей валов и осей механизмов машин комбинированными покрытиями.

**Предмет исследования** – закономерности изменения несущей способности комбинированных восстановительных покрытий изношенных посадочных поверхностей валов под подшипники качения.

**Методы исследования.** Системный подход и анализ, логика научных исследований, математическое моделирование с использованием современных расчетных комплексов. Разработаны частные методики лабораторных исследований с использованием методов математической статистики и современных вычислительных комплексов.

**Научная новизна работы состоит:**

– в разработке конечно-элементной математической модели на основе программного комплекса ANSYS, адекватно описывающей процесс нагружения восстановленного комбинированным методом подшипникового соединения с учётом условий его эксплуатации;

– в разработке метода определения параметров обобщённой модели Максвелла, описывающей диссипацию механической энергии в слое полимерной композиции;

– в установлении физико-механических и реологических характеристик ряда современных импортных и отечественных полимерных материалов, а также комбинированных покрытий на их основе;

– в определении оптимальных свойств полимерных материалов для восстановления изношенных посадочных поверхностей валов под подшипники качения комбинированием их применения с ЭМО.

**Практическую значимость представляют:**

- усовершенствованные методики исследования свойств полимерных восстановительных материалов;

- полученные значения физико-механических и реологических свойств современных полимерных материалов, используемых для восстановления изношенных деталей (Анатерм-201 (НИИ полимеров, Россия), Loctite 3472 (ФРГ));

– разработанное программное обеспечение для определения напряжённо-деформированного состояния при контактном взаимодействии сопряжённых поверхностей деталей машин (свидетельства о гос. регистрации № 2013617628 и № 2014613992);

– типовой технологический процесс восстановления подшипниковых соединений комбинированием ЭМО с нанесением полимерных материалов.

### **На защиту выносятся:**

- конечно-элементная математическая модель, адекватно описывающая процесс нагружения восстановленного подшипникового соединения в процессе его монтажа и дальнейшей эксплуатации;

- метод определения параметров обобщённой модели Максвелла, описывающей диссипацию механической энергии в слое полимерной композиции;

- результаты исследования физико-механических и реологических свойств современных полимерных материалов, восстановительных покрытий на их основе;

- технологические решения по формированию восстановительного покрытия в соединении «вал - внутренне кольцо подшипника» на основе комбинирования ЭМО с нанесением полимерных материалов;

- типовой технологический процесс восстановления изношенных посадочных поверхностей валов под подшипники качения комбинированием ЭМО с нанесением полимерных покрытий.

**Достоверность** основных положений работы подтверждена сходимостью теоретических и экспериментальных исследований (расхождение не более 5%). Результаты исследований прошли широкую апробацию в печати и научно-практических конференциях, внедрены в производство.

**Реализация работы.** Результаты исследований внедрены в ООО «Агро-сервис», ООО «Эффект Гарантия», используются в учебном процессе института механики и энергетики ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева».

**Личный вклад** автора состоит в разработке представленной математической модели, определении физико-механических свойств и реологических констант ряда современных полимерных материалов, проведении производственной проверки полученных результатов и разработанной технологии, написании научных статей, оформлении заявок на получение охранных документов на программы для ЭВМ.

**Апробация работы.** Основные результаты исследований доложены на семинарах, конференциях, советах и т.д.:

– Международной научно-практической конференции «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы» (Саранск, 2012 г.);

– ежегодных Огаревских чтениях, проводимых в Мордовском госуниверситете (Саранск, 2009 – 2014 гг.);

– конференциях профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов Мордовского госуниверситета (Саранск, 2009 – 2013 гг.);

– республиканской научно-практической конференции «Роль науки в развитии хозяйственного комплекса республики» (Саранск, 2013 г.);

– расширенном заседании кафедры механизации переработки сельскохозяйственной продукции Мордовского госуниверситета имени Н.П. Огарева (Саранск, 2014 г.).

По теме диссертации автором опубликовано 11 печатных работ, в том числе 3 опубликованы в изданиях рекомендованном ВАК РФ, получено 2 свидетельства государственной регистрации программ для ЭВМ. Общий объем публикаций составляет 4,2 п. л., из них автору принадлежит 3,1 п.л.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, общих выводов, списка литературы из 120 наименований. Работа представлена на 140 с., содержит 47 рисунков и 10 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность научной проблемы, сформулирована цель работы, раскрыты ее научная новизна и практическая значимость.

**В первой главе** произведен анализ состояния вопроса и сформулированы задачи исследования. Изучение литературных источников показал, что валы, являясь, как правило, ресурсными деталями, в полной мере определяют надежность всего механизма машины. Причем до 70% дефектов данных деталей связано с износом посадочных поверхностей, образующих неподвижные соединения, в частности с подшипниками качения. Причиной нарушения неподвижности посадок в процессе их эксплуатации являются силовые, температурные и износные факторы.

При выборе существующего или разработке нового способа восстановления изношенной поверхности шейки вала наряду с необходимостью обеспечения высокого ресурса неподвижного соединения необходимо добиваться значительного снижения себестоимости ремонта. Существующие методы восстановления, в большинстве случаев, или не обеспечивают необходимой долговечности отреставрированного соединения, или требуют значительных затрат из-за высокой трудоемкости, дополнительных капитальных вложений и т.д.

Из анализа способов восстановления валов следует, что решение данной проблемы видится в комбинировании уже существующих способов восстановления, в частности метода элетромеханической обработки с использованием современных полимерных материалов. Однако такой подход требует дополнительных теоретических и экспериментальных исследований, в том числе математического моделирования процесса нагружения комбинированного покрытия.

Для реализации поставленной цели в работе были сформулированы следующие **задачи исследования**:

- провести анализ причин отказов неподвижных соединений валов механизмов машин и существующих технологических процессов их восстановления;
- разработать конечно-элементную математическую модель, адекватно описывающую процесс нагружения восстановленного подшипникового соединения в процессе его монтажа и эксплуатации;

– разработать метод определения параметров обобщённой модели Максвелла, описывающей диссипацию механической энергии в слое полимерной композиции;

– исследовать физико-механические и реологические свойства импортных и отечественных полимерных материалов, а также комбинированных покрытий на их основе;

– провести математическое моделирование несущей способности комбинированного покрытия, найти оптимальные технологические решения по его формированию, разработать типовой технологический процесс восстановления изношенных соединений «шейка вала - внутренне кольцо подшипника».

**Во второй главе** представлена математическая модель, позволяющая описать процесс нагружения комбинированного покрытия изношенной детали с определением ее напряженно-деформированного состояния как на стадии монтажа, так и при эксплуатации восстановленного неподвижного соединения.

Процесс нагружения восстановительного покрытия (рисунок 1) может быть разделен на две стадии, различающиеся особенностями его напряженно-деформированного состояния.

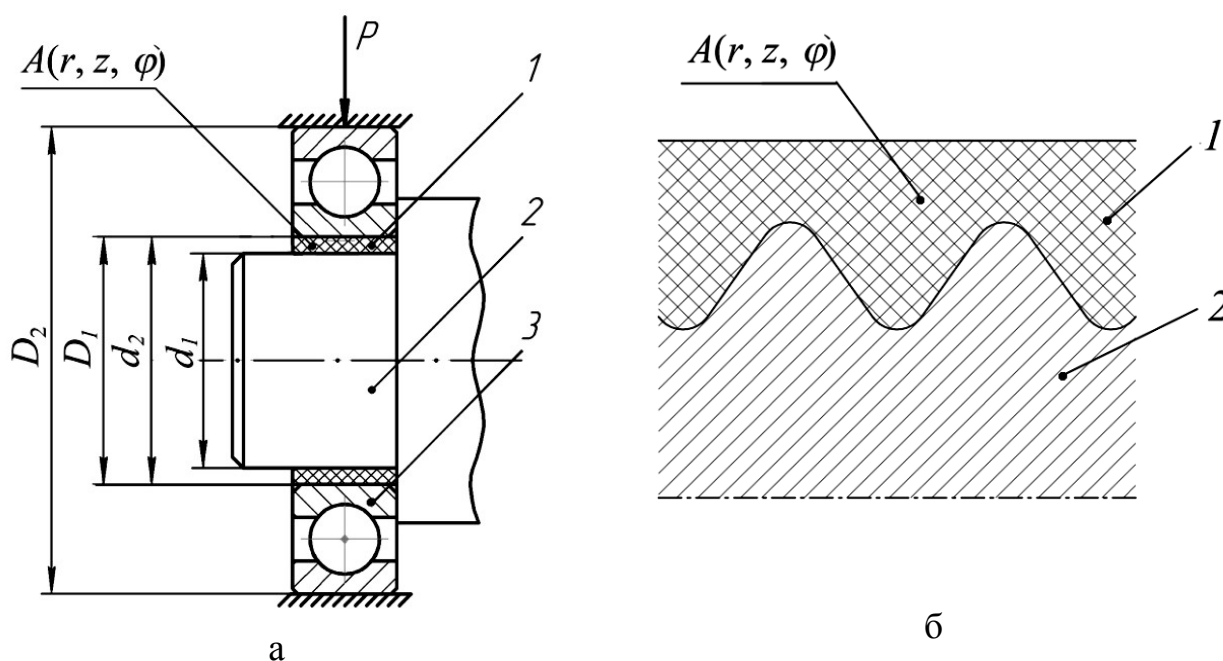


Рисунок 1 – Схема нагружения восстановленного подшипникового соединения (а) и форма поверхности вала (б), полученная ЭМО:  $d_1$  – диаметр изношенного вала;  $d_2$  – диаметр вала, восстановленного комбинированным покрытием;  $D_1$  – диаметр внутреннего кольца подшипника;  $D_2$  – диаметр наружного кольца подшипника; 1 – восстановительное покрытие; 2 – вал; 3 – подшипник

Первая – стадия монтажа охватывает промежуток времени  $0 \leq t_l \leq t_m$  от соприкосновения поверхности внутреннего кольца подшипника при его запрессовке с восстановительной поверхностью шейки вала (при  $t = 0$ ) с образованием начальной поверхности контакта до момента  $t = t_m$ , при котором восстанови-

тельный слой с некоторой скоростью  $U$  будет деформирован на величину  $\Delta h = h - h_0$ .

Вторая – стадия статического нагружения охватывает весь промежуток времени  $t_m \leq t_2 \leq t_{омк.}$  от окончания первой стадии до момента нарушения неподвижности посадки ( $t = t_{омк.}$ ). Стадия в общем случае неизотермична, характеризуется старением (внутренним» износом) полимерного материала с изменением его реологических характеристик, релаксацией напряжений и накоплением пластических деформаций.

Нелинейная математическая модель, воспроизводящая основные особенности монтажа и эксплуатации восстановленного соединения, содержит следующие компоненты (рисунок 2).

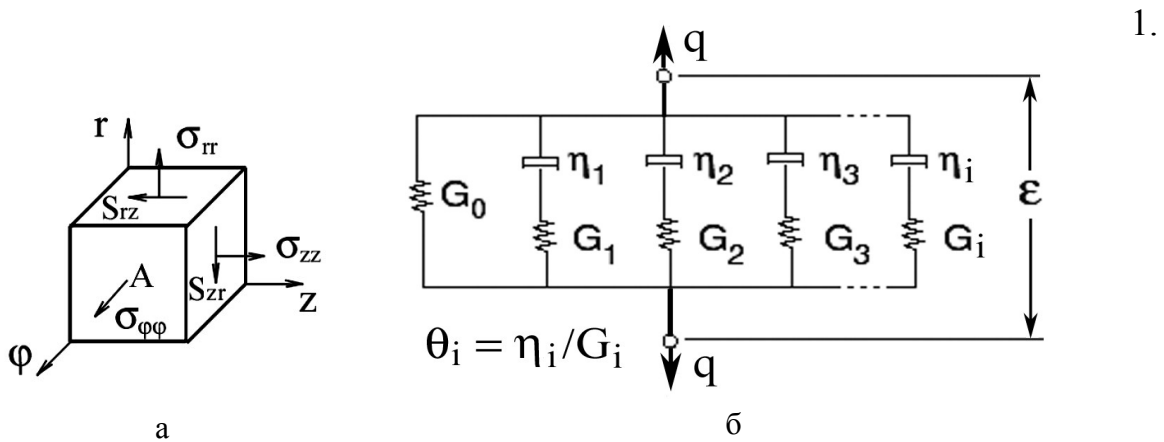


Рисунок 2 – Напряженное состояние произвольной точки А массива восстановительного покрытия и обобщённая модель вязкоупругой среды Максвелла

Уравнения равновесия для случая нагружения осесимметричного массива:

$$\begin{aligned} r \partial \sigma_{zz} / \partial z + \partial (r \sigma_{rz}) / \partial r = 0; \quad \sigma_{ij} = S_{ij} + \delta_{ij} p; \\ \partial (r \sigma_{rr}) / \partial r - \sigma_{\phi\phi} + r \partial \sigma_{rz} / \partial z = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\sigma_{ij}$  – компоненты полного тензора напряжений, Па;  $S_{ij}, p$  – компоненты девиатора и шарового тензора напряжений, Па;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $i, j = r, z, \phi$  – направления координатных осей.

2. Реологическую модель слабосжимаемой вязкоупругой среды в составе уравнений наследственной теории Больцмана-Вольтерры:

$$\sigma_{ij}(t) = \int_0^t 2G(t-\tau) \frac{\partial e_{ij}}{\partial \tau} \partial \tau + \delta_{ij} \int_0^t K(t-\tau) \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial \tau} \partial \tau, \quad (2)$$

где  $G(t-\tau)$  и  $K(t-\tau)$  – сдвиговые (девиаторные) и объёмные (гидростатические) функции релаксации (для дискретного спектра времен релаксации, описываемого обобщенной моделью Максвелла (рис. 2 б); при зависимости гидростатических напряжений непористых полимеров только от объёмной деформации указанные функции сводятся к выражениям (3-4));  $e_{ij}, \varepsilon_v$  – девиаторные и объёмные компоненты тензора деформаций.

$$G(t) = G_0 \left[ 1 - \sum_{i=1}^n \frac{G_i}{G_0} (1 - e^{-t/\theta_i}) \right]; \quad (3)$$

где  $G_0$  – начальное значение сдвигового модуля упругости, Па;  $G_i, \theta_i$  – дискретные значения модулей (Па) и времен релаксации (с) материалов полимерных деталей.



3. Объёмный модуль восстановительного материала, который зависит только от температуры эксплуатации восстановленного подшипникового узла,

$$K = f(T). \quad (4)$$

Реокинетические константы (времена релаксации, объёмный и линейный модули упругости) приводятся к температуре эксплуатации.

Применительно к условиям поставленной задачи решение данной системы дифференциальных уравнений в частных производных аналитическими методами не представляется возможным.

Наиболее достоверно и полно описать напряженно-деформированное состояние (НДС) элементов восстановленного подшипникового узла позволяют технологии компьютерного моделирования, поэтому в качестве среды моделирования выбрана универсальная программная система конечно-элементного анализа ANSYS (ANSYS Inc., США), а основного инструмента – язык параметрического программирования APDL (ANSYS Parametric Design Language).

С учетом геометрических особенностей подшипникового узла область исследования ограничена непосредственно зоной соединения "восстановленный вал - подшипник" (рисунок 1). В качестве объекта использовано восстановленное подшипниковое соединение первичного вала коробки передач автомобиля ГАЗ-53-12 (подшипник 50209).

Нагружение подшипникового соединения осуществляется в несколько последовательных шагов с передачей НДС между ними. На первом шаге нагружения моделируется монтаж кольца подшипника на валу по известной посадке с натягом за счет предварительно заданной разницы диаметров сопрягаемых деталей ( $d_2 > D_1$ ). На втором шаге нагружения к восстановленному валу прикладывается радиальная нагрузка  $P$ , величина которой задается в соответствии с предварительно определенными реакциями в подшипниковом узле. На третьем шаге нагружения моделируется выдержка элементов узла под радиальной нагрузкой, заданной на предыдущем шаге, в течение длительного времени с целью исследования влияния релаксационных процессов в металлополимерном покрытии вала на НДС элементов подшипникового соединения.

Конечно-элементная модель построена по схеме «снизу вверх» в препроцессоре PREP7 системы ANSYS. На первом этапе построения с учетом симметрии модели созданы 2D-сечения подшипника, металлополимерного слоя и вала с исходными размерами, обеспечивающими необходимый натяг в соединении.

Релаксационные свойства материала металлополимерного покрытия предварительно исследованы в ходе ускоренных испытаний в термокамере универсальной испытательной машины GOTECH AI-7000M и заданы в модели в виде параметров релаксационных PRONY-функций для сдвигового модуля

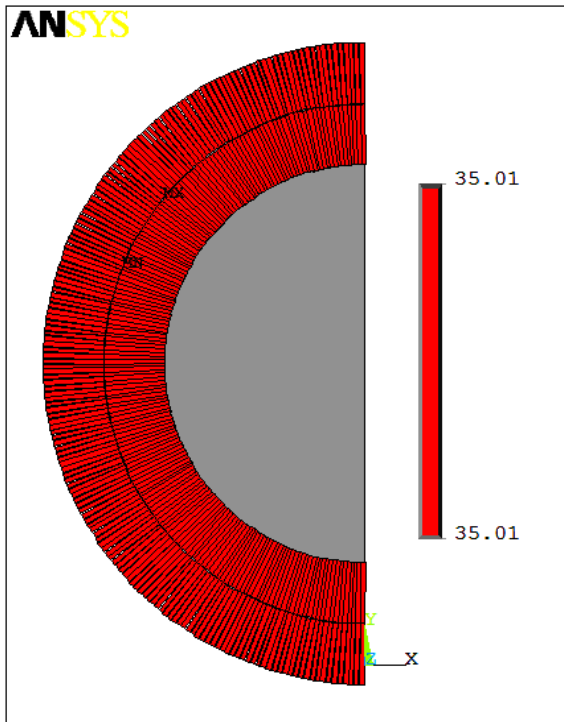


Рисунок 3 – Распределение контактных давлений (МПа) при запрессовке подшипника на восстановленный вал при величине натяга 40 мкм.

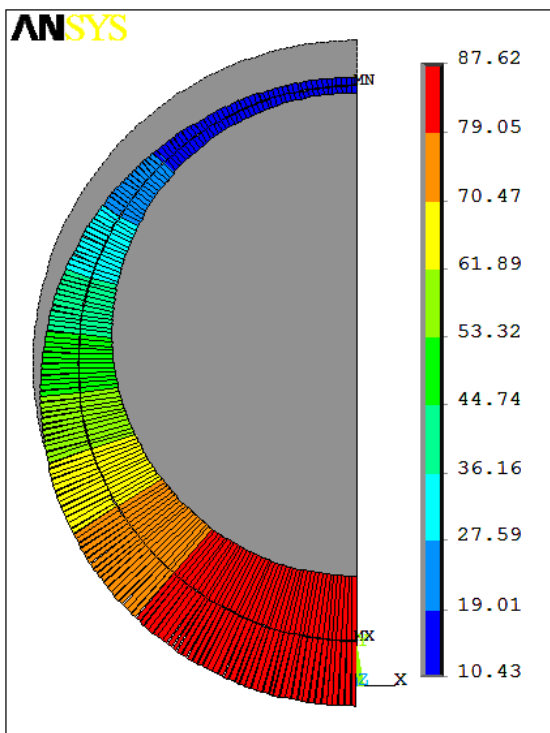


Рисунок 4 – Распределение контактных давлений (МПа) при эксплуатации восстановленного подшипникового соединения при значении радиального усилия  $P = 1,5$  кН.

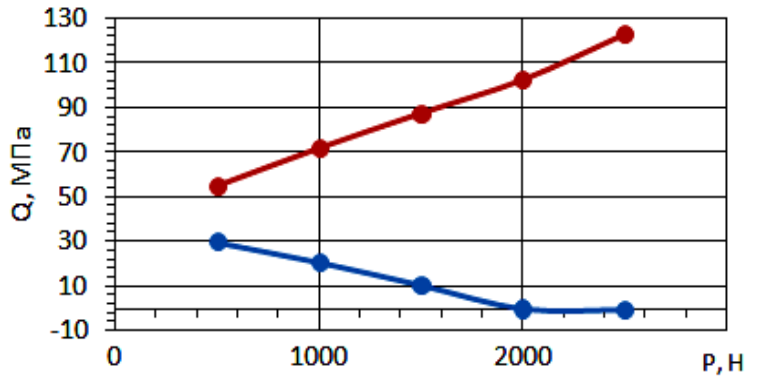


Рисунок 5 – Расчетные значения контактных давлений в восстановленном соединении при различных значениях радиальной нагрузки ( $G = 32,4$  МПа,  $K = 1050$  МПа)

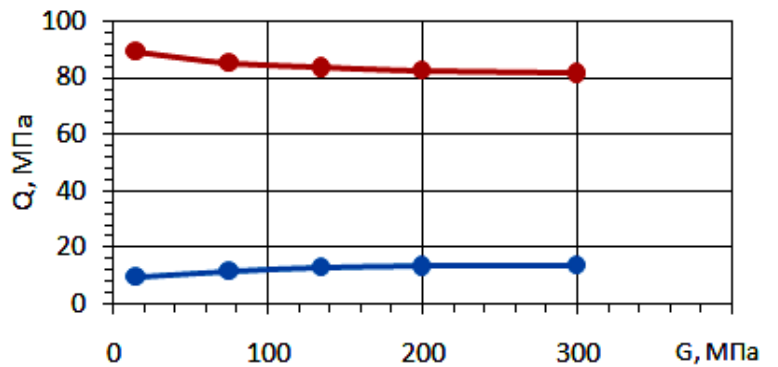


Рисунок 6 – Расчетные значения контактных давлений в восстановленном соединении при различных значениях модуля сдвига ( $P = 1,5$  кН,  $K = 1050$  МПа)

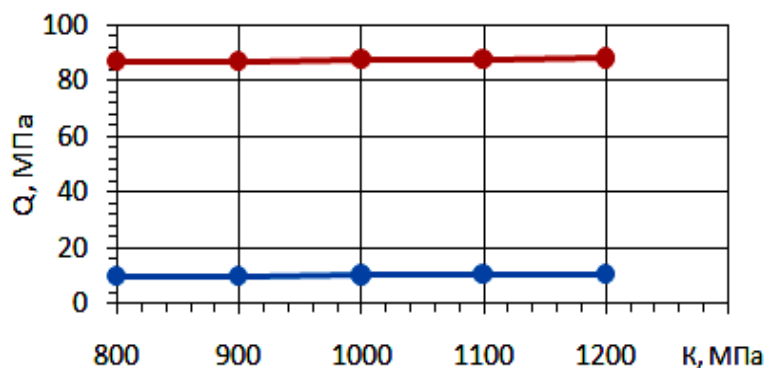


Рисунок 7 – Расчетные значения контактных давлений в восстановленном соединении при различных значениях объемного модуля ( $P = 1,5$  кН,  $G = 32,4$  МПа)

упругости. Модели материала вала и подшипника созданы на основе модели Гука и инициализированы на основе справочных данных.

На все созданные площади сечений нанесены сетки твердотельных конечных элементов в плоском деформированном состоянии с использованием смешанной U-p-формулировки.

На четвертом этапе созданы две контактные пары соединения, использующие в контактном алгоритме расширенную формулировку Лагранжа для повышения сходимости решения. Первая, типа "Standart" позволяет моделировать скольжение с трением в паре «металлополимерное покрытие – подшипник». Вторая позволяет смоделировать адгезионное взаимодействие в паре «металлополимерное покрытие – вал».

На рисунках 3, 4 представлены распределения контактных давлений в

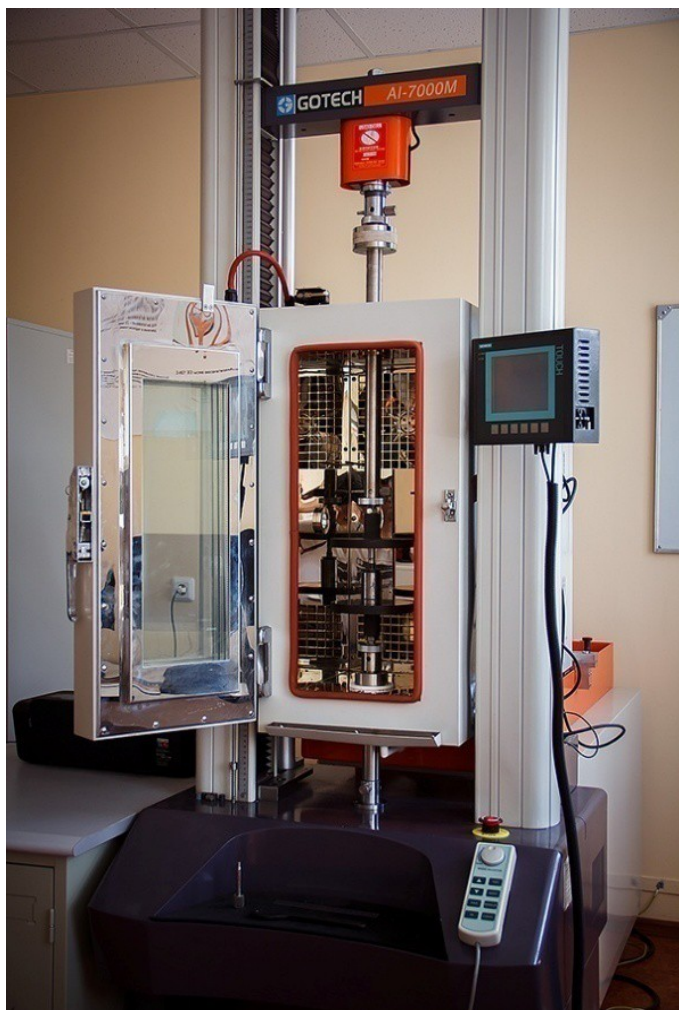


Рисунок 8 - Разрывная машина GOTECH AI-7000M оборудованная термокамерой GT-7001-NC6

восстановленном подшипниковом соединении при монтаже и эксплуатации.

На рисунках 5-7 представлены зависимость изменения контактных давлений в восстановительном покрытии в нижней (1) и верхней (2) части поверхности вала от нагрузки  $P$ , объёмного модуля  $K$  и модуля сдвига  $G$  полимерного материала.

Исследования показали, что в большей степени на изменение контактных давлений оказывает влияние нагрузка, в меньшей – объёмный модуль и модуль сдвига полимера.

Для реализации разработанной математической модели, поиска оптимальных решений необходимо было разработать методики экспериментального определения ряда физико-механических и реологических констант полимерных композиций, выбранных для восстановления подшипниковых соединений.

**В третьей главе** приведены методики экспериментальных исследований, охарактеризованы научно-исследовательское оборудование и средства измерения.

Исследования проводились на разрывной машине AI-7000M компании GOTECH Testing Machines Inc., оборудованной термокамерой GT-7001-НС6 компании UGNLab Co.,Ltd. Testing Equipment (рисунок 8).

На рисунках 9 и 10 представлены оснастки для исследования прочностных, физико-механических и реологических характеристик полимерных материалов.

Для интерактивного управления универсальной испытательной машиной, обработки и визуализации результатов испытаний в режиме реального времени и пост-обработки архивированных и систематизированных результатов применяется разработанный программный комплекс UGN60R.

Для оценки прочности сцепления при сдвиге металлополимерных материалов использовался метод, который состоит в том, что цилиндрический образец 5 из исследуемого материала с нанесенным на него в виде кольцевого пояса покрытием 6 продавливался через матрицу 7 (рисунок 9). При этом под действием касательных напряжений происходило разрушение покрытия, а напряжение сдвига характеризовало прочность сцепления полимерного материала с основой.

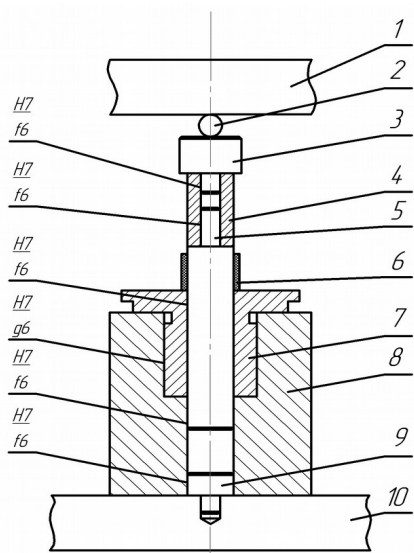


Рисунок 9 – Оснастка для исследования прочностных характеристик полимерных композиций: 1 – подвижная траверса; 2 – шарик; 3 – пятка; 4 – втулка; 5 – вал; 6 - испытуемый слой материала; 7 – матрица; 8 – корпус; 9 – фиксатор; 10 – неподвижная траверса.

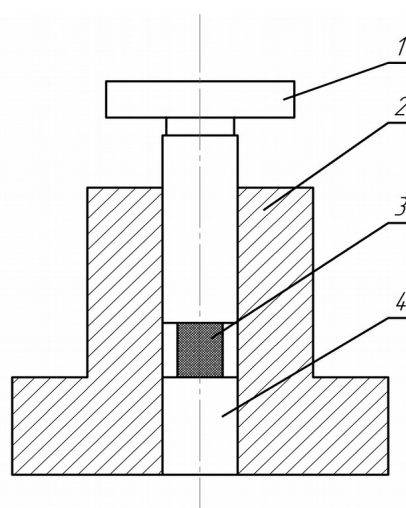


Рисунок 10 – Оснастка для исследования физико-механических и реологических констант полимерных материалов: 1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – полимерный образец; 4 – опорный элемент.

Время релаксации и сдвиговой модуль упругости полимерных материалов определялись на основе экспериментальных исследований полимерных материалов на сжатие с помощью соответствующей оснастки (рисунок 11) по разработанной программе MAXWELL (свидетельство о гос. регистрации №2013617628).

Вначале строится обобщённая кривая зависимости изменения модуля сдвига полимера от времени нагружения (рисунок 8).

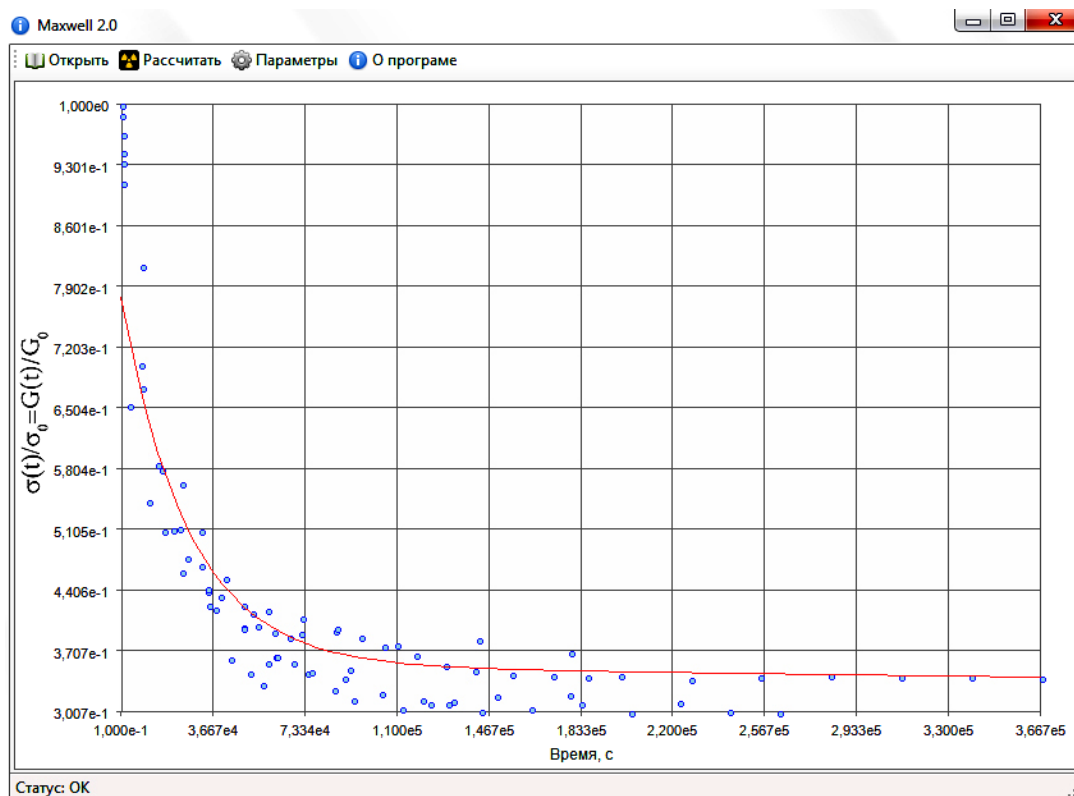


Рисунок 11 – Основное окно ПК MAXWELL: точки - экспериментальные значения ( $T = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), линия – аппроксимация экспериментальной кривой релаксации напряжений в образцах из металлополимерной композиции Анатерм-201 уравнением (3)

Тангенс угла  $\alpha$  наклона прямой, аппроксимирующей совокупность экспериментальных точек, позволяет определить искомое  $n$ -ое время релаксации  $\Theta_n = -1/\text{tg}\alpha$ , а отрезок, отсекаемый этой прямой на оси ординат графика зависимости – сдвиговой модуль упругости  $n$ -ого релаксатора  $G_n = \exp(b_n)$ .

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований.

На рисунке 12 представлены зависимости изменения объемного модуля, а на рисунке 13 – линейного модуля полимерных композиций от температуры испытания.

На рисунке 14 представлены результаты исследования изменения коэффициентов Пуассона.

Исследование когезионной прочности полимерных покрытий, полученных на основе использования Анатерм-201 и Loctite 3472, в зависимости от температуры испытаний показали, что значения предела прочности на срез у этих материалов близки (рисунок 15), а значения их физико-механических характеристик в значительной степени зависят от температуры испытания.

Полученные результаты экспериментальных исследований были использованы при математическом моделировании процессов монтажа и нагружения комбинированного покрытия в эксплуатации.

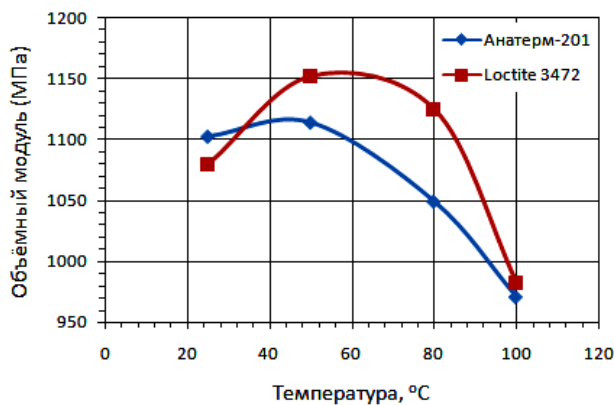


Рисунок 12 - Зависимость объемного модуля упругости полимерных композиций от температуры

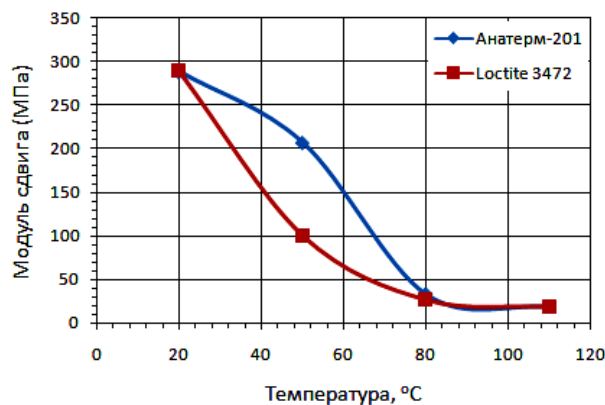


Рисунок 13 - Изменение модуля сдвига полимерных композиций от температуры

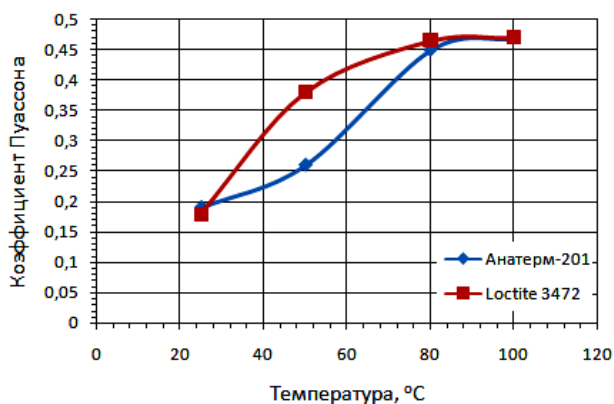


Рисунок 14 - Изменение коэффициентов Пуассона полимерных композиций

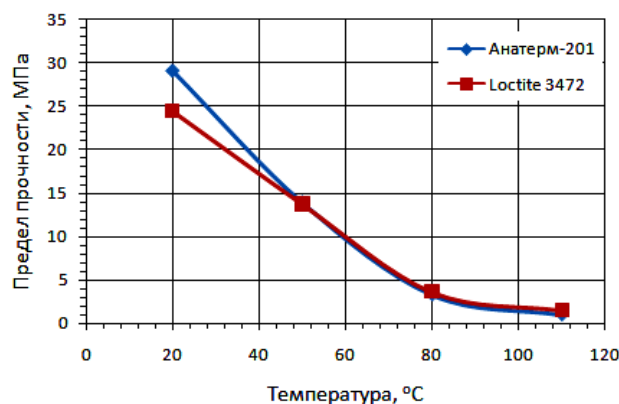


Рисунок 15 - Изменение предела прочности на сдвиг полимерных композиций Анатерм-201 и Loctite 3472

На первом этапе моделировался процесс монтажа соединения «вал-подшипник». Полученные при этом максимальные касательные напряжения, возникающие в полимерном покрытии, сравнивались с предельными значениями прочности на срез.

Проведенные исследования показали, что при запрессовке подшипника на восстановленный вал разрушения полимерного слоя, образованного Анатерм-201 и Loctite 3472 по поверхности вала, предварительно полученной ЭМО, не произойдет из-за того, что предел прочности на сдвиг этих материалов (29 МПа – Анатерм -201 и 24, 5 МПа – Loctite 3472) превышает максимальные касательные давления, образующиеся при монтаже (12,3 МПа).

На втором этапе моделировался процесс нагружения восстановленного соединения. Исходными данными для расчетов являлись геометрические параметры сопрягаемых деталей, нагрузочный режим, объемный и сдвиговой модули полимерного материала при температуре эксплуатации ( $t = 80^{\circ}\text{C}$ ).

В результате проведения многофакторного эксперимента была получена следующая регрессионная математическая модель, позволяющая рассчитать контактные давления в восстановленном соединении  $Q$  (МПа)

$$Q = \frac{e^{27,6367}}{P^{(3,5524 - 0,2051 \cdot \ln K - 0,259 \cdot \ln G)} \cdot G^{1,3579} \cdot K^{1,7805}}$$

где  $P$  – нормальная сила, Н;  $K$  – объемный модуль полимерного материала, МПа;  $G$  – сдвиговой модуль полимера, МПа.

Поиск оптимальных решений проводился из условия обеспечения в неподвижной посадке минимально-допустимых значений контактных давлений  $Q_{min}$  между поверхностью восстановленного вала и внутреннего кольца подшипника. Установлено, что с учетом реальной эксплуатационной нагрузки для восстановления посадочной поверхности первичного вала КП ГАЗ-53-12 под задний подшипник рекомендуется использовать полимерные композиционные материалы с объемным модулем не менее 600 МПа и сдвиговым модулем более 20 МПа. Этим условиям удовлетворяют исследуемые Анатерм-201 и Loctite 3472.

На основе проведенных исследований был разработан типовой технологический процесс восстановления посадочных поверхностей валов и осей под подшипники качения, который состоит из предварительной электромеханической обработки изношенной поверхности на следующих режимах: напряжение трансформатора 3В, сила тока 550А, скорость 2 м/мин, подача 0,45 мин<sup>-1</sup>, усилие прижатия высаживающей пластины 1000Н. после этого поверхность детали обезжиривается и на нее наносится слой полимерной композиции (Анатерм-201 или Loctite 3472). После полимеризации композиции восстанавливаемая поверхность шлифуется в номинальный размер.

Технико-экономическую эффективность разработанной технологии оценивали по стоимости восстановления 1 дм<sup>2</sup> поверхности условной цилиндрической детали диаметром 50 мм в сравнении с наиболее эффективными на настоящий момент существующими технологиями. Проведенные расчеты показали, что разработанный технологический процесс имеет наибольшую экономическую эффективность, что объясняется высокой производительностью процесса, минимальными капитальными вложениями, необходимыми для его внедрения.

Разработанный технологический процесс внедрен на малых инновационных предприятиях ООО «Агроресурс» и ООО «Эффект гарантия».

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Анализ состояния вопроса показал, что износы посадочных поверхностей валов под подшипники качения являются основными причинами потери работоспособности агрегатов трансмиссий автомобилей, тракторов, сельскохозяйственных машин. С целью повышения их ресурса и снижения себестоимости ремонта перспективным является разработка новых методов восстановления изношенных поверхностей комбинированными металлополимерными по-



крытиями, обладающими гарантированными физико-механическими, триботехническими и реологическими свойствами.

2. С целью определения возможности восстановления изношенных посадочных поверхностей валов на базе программного комплекса ANSYS разработана конечно-элементная математическую модель, адекватно описывающая процесс нагружения восстановленного комбинированным покрытием соединения «вал-подшипник» в процессе его монтажа и эксплуатации, позволяющая рассчитывать и визуально представлять значения контактных давлений, напряжений и перемещений в любой точке данного покрытия.

Разработан метод и компьютерная программа (свидетельство о гос. регистрации №2013617628) определения параметров обобщённой модели Максвелла, описывающей диссипацию механической энергии в слое полимерной композиции;

3. Исследования показали, что предел прочности на сдвиг восстановительных полимерных покрытий на основе отечественного клея-компаунда АНАТЕРМ-201 (29 МПа) и импортного Loctite 3472 (24,5 МПа), образованных на поверхности изношенного вала, предварительно обработанной ЭМО, значительно превышает предельные касательные давления, образующиеся при монтаже подшипника на вал (12,3 МПа).

4. Значения объёмного и сдвигового модуля упругости, коэффициента Пуассона у исследованных полимерных материалов Анатерм-201 и Loctite 3472 примерно равны и существенно зависят от температуры испытания. Так сдвиговой модуль с увеличением температуры с 20 до 80<sup>0</sup>С уменьшается с 290 до 18 МПа, в то же время коэффициент Пуассона возрастает с 0,18 до 0,47.

Объёмный модуль данных материалов, в свою очередь, до 60<sup>0</sup>С незначительно растёт, а после стремительно уменьшается и при 80<sup>0</sup>С составляет 1125 МПа у Loctite 3472 и 1050 МПа у Анатерм-201.

5. На основе математического моделирования, лабораторных исследований, натурного эксперимента определены оптимальные значения свойств полимерных материалов, при которых за все время эксплуатации не произойдет нарушения неподвижности подшипникового соединения, посадочное место вала которого восстановлено комбинированием ЭМО с полимерным покрытием ( $K \geq 600$  МПа;  $G \geq 20$  МПа).

Исследования позволяют рекомендовать отечественный АНАТЕРМ-201 и импортный Loctite 3472 в качестве восстановительного покрытия для изношенных посадочных поверхностей валов в сочетании с предварительной их электромеханической обработкой.

6. Разработан и апробирован новый типовой технологический процесс восстановления изношенных посадочных поверхностей валов под подшипники качения агрегатов трансмиссий отечественных и зарубежных тракторов, автомобилей, сельскохозяйственных машин, оборудования перерабатывающих производств комбинированием ЭМО с покрытием на основе полимерных композиций АНАТЕРМ-201 и Loctite 3472.



7. Разработанный технологический процесс внедрен в производство на малых инновационных предприятиях ООО «Агросервис» и ООО «Эффект Гарантия», а также в учебный процесс Института механики и энергетики Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева. Себестоимость восстановления 1 дм<sup>2</sup> поверхности условной цилиндрической детали диаметром 50 мм составляет 46,24 руб. (в ценах 2014 года), что значительно ниже показателей существующих на данный момент наиболее эффективных технологий.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

***Статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК РФ***

1. Котин А.В. Восстановление корпусных деталей машин комбинированными структурированными покрытиями / Котин А.В., Сивцов В.Н., Конаков А.В., Русяев А.В. // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. - №10. - С.47-49.
2. Котин А.В. Математическое моделирование процесса нагружения восстановленного неподвижного соединения «вал – подшипник / Котин А.В., Водяков В.Н., Кузнецов В.В., Конаков А.В., С.А. Ефанов // Труды ГОСНИТИ. – 2014. – Т.117.
3. Ефанов С.А. Восстановление ремонтно-технологического оборудования полимерными композиционными материалами / Котин А.В., Конаков А.В., С.А. Ефанов // Труды ГОСНИТИ. – 2014. – Т.117.

***Зарегистрированные программные средства***

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013617628. Программа определения параметров релаксаторов графическим способом «Maxwell» / Кузнецов В.В., Конаков А.В., Водяков В.Н. – 2013 г.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014613992. Программа для моделирования функционирования соединений типа «подшипник-вал», восстановленных комбинированным способом «Polyherz» / Кузнецов В.В., Конаков А.В., Котин А.В., Водяков В.Н. – 2014 г.

***Статьи в других изданиях***

6. Кузнецов В.В. Математическое моделирование процесса механической обработки многослойных металлополимерных покрытий / Кузнецов В.В., Конаков А.В., Сивцов В.Н., Котин А.В. // Наука и инновации в Республике Мордовия: Материалы VII респ. науч - практ. конф. - Саранск, 2008. –С. 65-70
7. Конаков А.В. Лабораторный комплекс для исследования физико-механических и реологических свойств материалов и покрытий / Конаков А.В., Водяков В.Н., Котин А.В., Сивцов В.Н. // Повышение эффективности функционирования механических и энергетических систем: Материалы Всерос. науч.-техн. конф., 19-23 окт. 2009 г. - Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2009. – С. 145-147.
8. Конаков А.В. Исследование физико-механических характеристик металлополимерных композиций / Конаков А.В., Котин А.В., Кузнецов В.В., Пряхин А.А. // XXXIX Огарёвские чтения: материалы науч. конф.: в 3 ч. Ч. 1: Технические науки. – Саранск: Изд-во. Мордов. ун-та., - 2011. – С. 59-63.
9. Конаков А.В. Исследование физико-механических и реологических свойств полимерных компаундов для восстановления деталей типа «вал» / Конаков А.В., Водяков В.Н., Котин А.В., Кечаев А.А. // XL Огарёвские чтения: материалы науч. конф.: в 3 ч. Ч. 1: Технические науки. – Саранск: Изд-во. Мордов. ун-та., - 2012. – С. 3-8.
10. Сивцов В.Н. Восстановление корпусных деталей машин наноструктурированными покрытиями / Сивцов В.Н., Котин А.В., Конаков А.В., Русяев А.В. // Энергоэффективные и

ресурсосберегающие технологии и системы: Межвуз. сб. науч. тр. / МГУ им. Н.П. Огарева. - Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2012. - С.352-357.

11. Русяев А.В. Реальность и перспективы восстановления валов автотракторной техники / Русяев А.В., Конаков А.В., Сивцов В.Н. // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: Межвуз. сб. науч. тр. / МГУ им. Н.П. Огарева. - Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2012. - С.357-361.

12. Кузнецов В.В. Модифицированный метод и программный комплекс MAXWELL для определения параметров обобщенной модели Максвелла / Кузнецов В.В., Конаков А.В., Водяков В.Н., Кечаев А., Кечаева О. // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: Межвуз. сб. науч. тр. / МГУ им. Н.П. Огарева. - Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2012. - С.403-410.

13. Котин А. В. Компьютерное моделирование функционирования соединения "подшипник – вал", восстановленного комбинированным способом / Котин А. В., Водяков В. Н., Кузнецов В. В., Конаков А. В. // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: межвуз. сб. науч. тр. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2013. - С. 401-408.