

БУТИН Антон Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ
НЕПОДВИЖНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОДШИПНИКОВ
КАЧЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ
ПОЛИМЕР-ПОЛИМЕРНЫМИ КОМПОЗИЦИЯМИ**

Специальность 05.20.03 Технологии и средства технического
обслуживания в сельском хозяйстве

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Мичуринск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Мичуринский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВПО МичГАУ) и 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, профессор,
Воронежский государственный технический университет/ВГТУ, профессор

Портнов Николай Ефимович – кандидат технических наук, доцент,
Тамбовский государственный технический университет/ТГТУ, доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса» (ФГБНУ «Росинформагротех»)

Защита состоится 23 марта 2012 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета ДМ 220.041.03 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Мичуринский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВПО МичГАУ) по адресу: 393760, Тамбовская область, г. Мичуринск, ул. Интернациональная 101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО МичГАУ

Автореферат разослан « » февраля 2012 г. и размещен на сайте ФГБОУ ВПО МичГАУ www.mgau.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета

Н. В. Михеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Долговечность подшипниковых узлов, в виду их многочисленности, оказывает значительное влияние на надёжность всей машины. Поэтому повышение долговечности подшипниковых узлов, снижение себестоимости ремонта, путём восстановления неподвижных соединений подшипников качения, является актуальной задачей, решение которой позволит повысить надёжность сельскохозяйственной техники, снизить расходы на обслуживание и ремонт.

Износ посадочных мест подшипников из-за фреттинг-коррозии является главной причиной появления дефектов, приводящих к отказам подшипниковых узлов. Восстановление посадочных мест подшипников полимерными материалами исключает явление фреттинг-коррозии и позволяет повысить долговечность подшипниковых узлов.

В настоящее время перспективным направлением в повышении эффективности восстановления неподвижных соединений подшипников является разработка полимерных композиционных материалов (ПКМ). Введение наполнителей в полимер позволяет значительно увеличить долговечность подшипниковых узлов и снизить себестоимость восстановления неподвижных соединений. Это создает основу для разработки высокоэффективных технологических процессов восстановления, обеспечивающих дальнейшее повышение долговечности подшипниковых узлов и снижение затрат на ремонт сельскохозяйственной техники.

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 2006...2010 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 неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники полимер-полимерным композиционным материалом, обеспечивающим увеличение долговечности подшипниковых узлов и снижение себестоимости восстановления неподвижных соединений.

Объект исследований. Пленки акрилового адгезива АН-105 и композиции на его основе, клеевые соединения подшипников качения с деталями, выполненные акриловым адгезивом АН-105 и композицией на его основе.

Предмет исследований. Деформационно-прочностные свойства пленок акрилового адгезива АН-105 и композиции на его основе, прочность, теплообразование, виброактивность и долговечность клеевых соединений подшипников качения с деталями, выполненных акриловым адгезивом АН-105 и композицией на его основе.

Методика исследования представлена теоретическими исследованиями на основе теории прочности и долговечности полимерных композиционных материалов, экспериментальными исследованиями полимеризации, теплового ба-

ланса, виброактивности, деформационно-прочностных свойств и долговечности клеевых соединений акрилового адгезива АН-105 и композиции на его основе. Достоверность полученных результатов исследования обусловлена применением современного исследовательского оборудования и приборов, методов дисперсионного анализа, результатами эксплуатационных испытаний.

На защиту выносятся:

- теоретические предпосылки повышения эффективности полимерных композиционных материалов при введении эластификаторов;
- результаты экспериментальных исследований процесса полимеризации, деформационно-прочностных свойств пленок и клеевых соединений акрилового адгезива АН-105 и композиции на его основе, прочности и долговечности неподвижных соединений подшипников качения с деталями, выполненных акриловым адгезивом АН-105 и композицией на его основе, теплового баланса, виброактивности и долговечности восстановленных подшипниковых узлов;
- технология восстановления неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники композицией на основе акрилового адгезива АН-105 и технико-экономическая эффективность разработанной технологии восстановления.

Научная новизна. Заключается в теоретическом обосновании повышения деформационно-прочностных свойств и долговечности эластифицированных ПКМ, уменьшения теплообразования и виброактивности, увеличения долговечности подшипниковых узлов, восстановленных эластифицированными ПКМ, определении оптимального состава полимер-полимерной композиции на основе адгезива АН-105, исследовании деформационно-прочностных свойств, теплообразования, виброактивности и долговечности клеевых соединений «подшипник-деталь», выполненных адгезивом АН-105 и композицией на его основе.

Практическая ценность заключается в разработанной технологии восстановления неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники композицией на основе акрилового адгезива АН-105.

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 2009...2011 гг.;
- XIII Международной научно-производственной конференции «Проблемы сельскохозяйственного производства на современном этапе и пути их решения», БелГСХА (г. Белгород), 2009.
- XV Международной научно-практической конференции «Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции», ГНУ ВИИТиН (г. Тамбов), 2009 г.;
- Международной научно-практической конференции «Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК», МичГАУ (г. Мичуринск), 2010 г.;

– XV Международной научно-производственной конференции «Проблемы сельскохозяйственного производства на современном этапе и пути их решения», БелГСХА (г. Белгород), 2011 г.;

– XVI Международной научно-практической конференции «Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции» - «Новые технологии и техника для растениеводства и животноводства», ГНУ ВНИИТиН (г. Тамбов), 2011 г.;

– заседании кафедры «Технология обслуживания и ремонта машин и оборудования» МичГАУ в 2011 г.

Публикации. По результатам выполненной работы опубликовано 11 печатных работ, в том числе три статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, получено два патента РФ на изобретение №2418025, №2430945.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 127 страницах машинописного текста, содержит 47 рисунков, 5 таблиц, 4 приложения и библиографию из 115 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 известных полимерных композиционных материалов для восстановления неподвижных соединений подшипников качения, способов повышения долговечности подшипников качения, рассмотрены тепловой баланс и виброактивность 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., Пучина Е. А., Черноиванова В. И. и многих других отечественных ученых. Учеными МГАУ, ГОСНИТИ, МичГАУ разработаны полимерные композиционные материалы и технологии восстановления неподвижных соединений подшипников качения с применением ПКМ. В настоящее время все более широкое распространение получают ПКМ на основе дисперсных наполнителей. Введение таких наполнителей увеличивает статическую прочность, теплопроводность, обеспечивает заданные потребительские свойства и позволяют значительно снизить себестоимость восстановления. Однако введение дисперсных наполнителей повышает модуль упругости, что не способствует снижению контактных напряжений в подшипниковых узлах. Технологической проблемой является обеспечение равномерности распределения дисперсных частиц наполнителя по объему полимерной матрицы, дисперсные наполнители склонны к агрегации.

Вышеуказанные недостатки можно исключить введением в полимерную матрицу, вместо дисперсных частиц, раствора эластификатора. Однако иссле-

дования в этой области проводились недостаточно. Необходимы теоретические исследования, которые позволят сформулировать технологические рекомендации по эластификации «жестких» полимеров. Практический интерес представляет эластификация акрилового адгезива АН-105, что позволит увеличить его ударную прочность, деформационно-прочностные свойства и соответственно долговечность подшипниковых узлов.

Одним из способов повышения долговечности подшипников качения является применение полимерных материалов в неподвижных соединениях подшипниковых узлов. Установлено, что чем меньше модуль упругости полимерного материала, тем меньше «коэффициент постели», больше коэффициент распределения нагрузки, меньше напряжения в зоне контакта нагруженных тел качения с беговыми дорожками и больше соответственно долговечность подшипников качения. Эластификация «жестких» полимеров является перспективным направлением в вопросе увеличения долговечности подшипниковых узлов и повышения эффективности технологий восстановления.

Теплопроводность полимерных материалов отличается от черных металлов примерно в 100 раз. Эта особенность затрудняет теплоотвод в восстановленных подшипниковых узлах в процессе эксплуатации. В тяжело нагруженных подшипниковых узлах повышение температуры полимерного материала из-за гистерезисных потерь, ухудшение теплоотвода может привести к значительному повышению температуры подшипника и смазочного материала, что может при определенных условиях снизить долговечность подшипникового узла. В настоящее время отсутствует информация о влиянии эластификации наполненных полимеров на тепловой баланс восстановленных подшипниковых узлов. Необходимы теоретические и экспериментальные исследования эластифицированных полимерных материалов, которые позволят установить их влияние на тепловой баланс восстановленных подшипниковых узлов.

Подшипники качения в машинах являются источниками вибраций с широким спектром частот от нескольких Гц до десятков кГц. Введение полимерного материала между контактирующими телами «подшипник-деталь» позволит снизить амплитуду вибрации, поэтому одним из путей снижения виброактивности подшипниковых узлов является эластификация «жестких» полимеров, используемых при восстановлении неподвижных соединений.

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

- разработать теоретические предпосылки повышения эффективности «жестких» полимерных материалов при введении растворов эластомеров;
- исследовать деформационно-прочностные свойства пленок и клеевых соединений, определить оптимальный состав ПКМ на основе адгезива АН-105, исследовать модуль механических потерь акрилового адгезива АН-105 и ПКМ на основе адгезива АН-105;
- исследовать процесс полимеризации ПКМ на основе адгезива АН-105 при различных условиях отверждения;
- исследовать прочность и долговечность неподвижных соединений подшипников качения восстановленных ПКМ на основе адгезива АН-105;

– исследовать тепловой баланс и виброактивность подшипниковых узлов восстановленных акриловым адгезивом АН-105 и ПКМ на основе адгезива АН-105;

– исследовать долговечность подшипников 209, с восстановленными неподвижными соединениями, при циркуляционном нагружении колец подшипников;

– разработать технологию восстановления неподвижных соединений подшипников качения ПКМ на основе акрилового адгезива АН-105 и оценить ее технико-экономическую эффективность.

Во второй главе «Теоретические предпосылки повышения эффективности полимер-полимерных композиционных материалов при введении эластификаторов» обосновано повышение прочности и долговечности эластифицированных ПКМ, уменьшение теплообразования и виброактивности, увеличение долговечности подшипниковых узлов, восстановленных эластифицированными ПКМ.

Условия совместимости полимерных материалов. Смесь полимеров определяется тем, совместимы (т.е. взаимно растворимы) или несовместимы смешиваемые полимеры. Скотт рассматривал смесь двух полимеров в присутствии растворителя как трехкомпонентную систему. Параметр взаимодействия двух полимеров предложено рассчитывать по формуле

$$\chi_{AB} = \frac{V_S}{RT} (\delta_A - \delta_B)^2, \quad (1)$$

где V_S – сравнительный объем, равный молярному объему растворителя, как правило принимают равным $100 \text{ см}^3/\text{моль}$; T – температура окружающей среды; R – газовая постоянная; δ_A и δ_B – параметры растворимости полимеров А и В.

При нормальной температуре уравнение (1) принимает вид

$$\chi_{AB} = (\delta_A - \delta_B)^2 / 6 \quad (2)$$

Параметры растворимости можно рассчитать по формуле

$$\delta = \rho \frac{\sum F_i}{M}, \quad (3)$$

где ρ – плотность полимера при данной температуре; $\sum F_i$ – сумма всех молярных констант притяжения химических групп в повторяющемся звене полимера; M – молекулярный вес повторяющегося звена полимера.

Условие взаимной растворимости (совместимости) полимеров имеет вид

$$\chi_{AB} < (\chi_{AB})_{кр} \quad (4)$$

Критическое значение параметра взаимодействия полимеров определяют по формуле

$$(\chi_{AB})_{кр} = \frac{\left\{ \frac{1}{x_A^{0,5}} + \frac{1}{x_B^{0,5}} \right\}^2 \left\{ \frac{1}{1-\phi_S} \right\}}{2}, \quad (5)$$

где x_A и x_B – степень полимеризации полимеров А и В соответственно, $x_A = 0,01M_A$, $x_B = 0,01M_B$; M_A и M_B – молекулярный вес полимеров А и В; ϕ_S – мольная доля растворителя.

После преобразований получим

$$(\chi_{AB})_{кр} = \frac{\left\{ \frac{10}{M_A^{0,5}} + \frac{10}{M_B^{0,5}} \right\}^2 \left\{ \frac{1}{1-\phi_S} \right\}}{2}, \quad (6)$$

Согласно теории Флори-Хаггинса чем ближе параметр χ_{AB} к нулю, тем более полимеры совместимы или взаимно растворимы, тем больше вариантов составов в которых они будут совместимы.

Увеличение деформационно-прочностных свойств полимер-полимерных композиционных материалов при введении эластификаторов.

Увеличение прочности при одноосном растяжении, а также ударной прочности полимерных материалов, эластифицированных каучуком объясняет теория *мультиплетного крейзования*. В настоящее время общепризнано, что поглощение энергии происходит в основном в полимерной матрице. Частицы каучука продвигают и регулируют деформации в матрице, обеспечивая значительные концентрации напряжений в тех местах, где могут быть инициированы локальные деформации. Преобладающим механизмом упрочнения является крейзование. При образовании одиночного крейза поглощается большое количество энергии. На образование 1 м² новой поверхности затрачивается энергия, равная 1 кДж. В результате увеличения количества крейзов, возникающих в процессе разрушения, происходит значительное рассеивание энергии.

Крейзование является первым этапом разрушения стеклообразных полимеров. При достаточно высоком напряжении фибриллярная структура крейзов разрушается и образуется истинная трещина. При достижении трещиной критического размера, материал разрушается. В упрочненном каучуком полимере частицы каучука не только инициируют образование крейзов, но и тормозят образование трещины критической длины.

Крейзование не является единственным механизмом, объясняющим упрочнение пластиков каучуками при растягивающих напряжениях. Кроме упругой деформации имеет место определенная сдвиговая текучесть, проявляющаяся в форме полос сдвига. В сдвиговых зонах молекулы ориентируются примерно параллельно приложенному растягивающему напряжению, т.е. нормально к плоскостям, в которых образуются крейзы. Так как образование и рост крейзов происходит именно в этом направлении, полосы сдвига оказывают влияние на торможение роста крейзов. С увеличением количества полос сдвига длина вновь образующихся крейзов уменьшается.

Уменьшение теплообразования, виброактивности и повышение долговечности полимер-полимерных композиционных материалов при циклическом нагружении. Количество теплоты, выделившейся в единицу времени в полимерном покрытии W определяют по формулам

$$W = f\pi E''(f, T)\Delta\varepsilon^2 \quad \text{или} \quad W = f\pi \sigma''(f, T)\sigma_a^2, \quad (7)$$

где f – частота циклического воздействия; E'' – модуль механических потерь;

$\Delta\varepsilon$ – амплитуда циклической деформации; c'' – податливость механических потерь; σ_a – амплитуда напряжения при регулярном циклическом нагружении.

Из формулы (7) следует, что чем меньше модуль механических потерь E'' и амплитуда циклической деформации $\Delta\varepsilon$, тем меньше количество тепла W образуется и соответственно выделяется в единицу времени в полимерном покрытии.

Модуль упругости композиционного материала можно рассчитать, используя правило смесей

$$E_{нк} = E_n V_n + E_{нан} V_{нан}, \quad (8)$$

где E_n и $E_{нан}$ – модули упругости полимерной матрицы и наполнителя; V_n и $V_{нан}$ – объемные доли полимерной матрицы и наполнителя.

Из формулы (8) следует, что введение эластомера, модуль упругости которого значительно меньше модуля упругости «жесткого» полимера, однозначно уменьшит модуль упругости композиции. Введение в «жесткий» полимер эластификатора повысит его упругость и по этой причине уменьшит модуль механических потерь. Повышение упругости материала также снизит амплитуду циклической деформации за счет демпфирования. Поэтому эластификация «жестких» полимеров позволит уменьшить теплообразование в восстановленных неподвижных соединениях и соответственно в подшипниковых узлах.

Подшипниковый узел можно представить в виде динамической системы, где демпфером является слой полимерного материала:

Смещение центра массы системы в момент t можно определить по формуле

$$y = a \cos pt, \quad (9)$$

где a – амплитуда колебаний, мм; p – круговая частота колебания, с⁻¹, которая определяется по формуле

$$p = \sqrt{\frac{c}{m}}, \quad (10)$$

где c – коэффициент жесткости демпфера (пружины) Н/см; m – масса груза, кг.

Таким образом, амплитуду колебаний для нашей системы можно выразить в виде формулы

$$a = \frac{y}{\cos\left(t\sqrt{\frac{c}{m}}\right)} \quad (11)$$

Откуда следует, что при уменьшении жесткости c и постоянных значениях других величин, знаменатель увеличится и, следовательно амплитуда колебаний уменьшится. Жесткость демпфера зависит от модуля упругости материала из которого он выполнен. Введение в «жесткий» полимер эластификатора уменьшит модуль упругости, соответственно коэффициент жесткости и по этой причине снизит амплитуду колебаний.

Известна формула Щукина для определения количества циклов испытаний N полимерного образца до разрушения образца

$$N = \frac{2RT}{\Omega \chi E \varepsilon_a^2} \ln \frac{\sigma_p}{\sigma_{\max}}, \quad (12)$$

где σ_p – предел прочности полимерного материала при одноразовом статическом растяжении; σ_{\max} – максимальное напряжение цикла; Ω – коэффициент, показывающий долю механических потерь, идущих на изменение потенциального барьера разрушения; χ – коэффициент механических потерь; ε_a – амплитуда деформации.

Из формулы (12) следует, что чем меньше коэффициент механических потерь χ и амплитуда деформации ε_a , тем большее число циклов нагружения выдержит полимерный образец не разрушаясь, тем больше его долговечность. Введение в «жесткий» полимер эластификатора повысит его упругость и по этой причине уменьшит коэффициент механических потерь. Повышение упругости материала также снизит амплитуду циклической деформации за счет демпфирования. Поэтому эластификация «жестких» полимеров позволит повысить их долговечность при циклическом нагружении.

Повышение долговечности подшипников качения при эластификации «жестких» полимеров. Известна зависимость между долговечностью подшипника качения и нагрузкой на наиболее нагруженное тело качения

$$L = \frac{C}{P_0^{3,33}} \frac{1}{z} n, \quad (13)$$

где L – долговечность подшипника; C – коэффициент работоспособности подшипника; n – частота вращения подшипника; z – число тел качения; P_0 – нагрузка на наиболее нагруженное тело качения.

Из формулы (13) следует, что сравнительно небольшое изменение нагрузки на наиболее нагруженное тело качения приводит к значительному изменению долговечности подшипника качения. Чем более равномерно распределена внешняя радиальная нагрузка P между телами качения, тем меньше нагрузка на центральное тело качения P_0 и больше соответственно долговечность подшипника L .

В работе проф. Курчаткина В. В. установлено, что при радиальном нагружении подшипника с полимерным покрытием происходит деформация наружного кольца в виде эллипса. При этом большая ось эллипса совпадает с направлением радиальной нагрузки. Чем меньше модуль упругости полимерного материала, тем больше деформация наружного кольца подшипника напротив центрального тела качения, тем большая часть радиальной нагрузки перераспределяется с центрального на боковые тела качения, тем выше коэффициент распределения нагрузки и соответственно долговечность подшипника.

В работе проф. Ли Р.И. изучен вопрос деформации поверхности дорожки качения наружного кольца подшипника с полимерным покрытием при контакте с наиболее нагруженным телом качения.

Площадка контакта двух тел, ограниченных криволинейными поверхностями и соприкасающихся до возникновения деформаций в одной точке, представляет эллипс с полуосями a и b . Величины a и b определяют по формулам

$$a = n_a \sqrt[3]{\frac{3 \eta P}{2 \Sigma \rho}}, \quad b = n_b \sqrt[3]{\frac{3 \eta P}{2 \Sigma \rho}}, \quad (14)$$

где n_a и n_b – коэффициенты, которые выбирают по таблице из справочника в за-

висимости от вспомогательного аргумента θ ; P – нормальная нагрузка сжимающая тела; η – упругая постоянная материалов соприкасающихся тел (коэффициент Кирхгофа).

$$\eta = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}, \quad (15)$$

где μ_1, μ_2, E_1, E_2 – соответственно коэффициенты Пуассона и модули упругости материалов первого и второго тел.

Вспомогательный аргумент θ зависит от главных кривизн соприкасающихся тел

$$\theta = \frac{\rho_{I1} - \rho_{I2} + \rho_{II1} - \rho_{II2}}{\sum \rho}, \quad (16)$$

где $\sum \rho = \rho_{I1} + \rho_{I2} + \rho_{II1} + \rho_{II2}$; $\rho_{I1} = \frac{1}{R_{I1}}$; $\rho_{I2} = \frac{1}{R_{I2}}$; $\rho_{II1} = \frac{1}{R_{II1}}$; $\rho_{II2} = \frac{1}{R_{II2}}$;

R_{I1}, R_{I2} – главные радиусы кривизны первого тела в точке начального касания, определенные в двух взаимноперпендикулярных плоскостях, линия пересечения которых совпадает с линией действия нормальной нагрузки; R_{II1}, R_{II2} – главные радиусы кривизны второго тела.

Максимальное напряжение σ_0 в центре площадки контакта можно определить по формуле

$$\sigma_0 = 1,5 \frac{P}{\pi ab}, \quad (17)$$

где P – нагрузка на тело качения; πab – площадь контакта в виде эллипса с полуосями a и b .

Наличие полимерной подложки (покрытия), модуль упругости которой на несколько порядков меньше чем у стали, приводит к увеличению коэффициента Кирхгофа η подшипника, большей деформации желоба наружного кольца при контакте с нагруженным телом качения, увеличению площади контакта и снижению контактного напряжения.

Таким образом, многократное повышение долговечности подшипника с полимерным покрытием (до 5,8 раз), в сравнении с подшипником стандартной конструкции, объясняется не только перераспределением нагрузки с центрального на боковые тела качения, но и большей деформацией дорожки качения с нагруженным телом качения, увеличением площади контакта и снижением как следствие контактного напряжения. Чем меньше модуль упругости полимерного материала, тем меньше контактные напряжения и выше долговечность подшипника. Эластификация «жестких» полимеров позволит уменьшить модуль упругости последних и повысить долговечность подшипников качения.

В третьей главе «Методика экспериментальных исследований» приведены общая методика исследований и частные методики исследования полимеризации, деформационно-прочностных свойств пленок и неподвижных соединений акрилового адгезива АН-105 и ПКМ на его основе, теплообразования, виброактивности и долговечности подшипниковых узлов, восстановленных акриловым адгезивом АН-105 и ПКМ на его основе.

Деформационно-прочностные свойства пленок акрилового адгезива АН-105

и ПКМ на его основе 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".

Прочность клеевых соединений АН-105 и ПКМ на его основе исследовали на образцах, представляющих клеевые соединения внутренних колец подшипников 209 с валами, изготовленными из стали 45. Отверждение соединения с толщиной клеевого шва $h = 0,1$ мм проводили в течение 24 ч при температуре 20 °С. Испытания образцов проводили на разрывной машине ИР 5047-50.

Измерения модуля механических потерь акрилового адгезива АН-105 и ПКМ на его основе проводили на измерительной установке, разработанной Бочаровым А.В. Принцип действия измерительной установки основан на методе свободно-затухающих крутильных колебаний.

Процесс полимеризации акрилового адгезива АН-105 и ПКМ на его основе исследовали диэлектрическим методом. Исследования проводили при температурах $T = 20; 30$ и 40°C . Температуру в 30 и 40°C обеспечивали в шкафу сушильном СНОЛ-3.5,3.5,3.5/3, оснащенный электронным терморегулятором. В качестве образцов служили клеевые соединения подшипников 209 с валами. Валы изготовили из стали 45. Электрическую емкость или сопротивление клеевого шва соединения измеряли прибором Е7-11. О завершении полимеризации судили по стабилизации значений характеристик клеевого шва.

Исследование теплообразования, виброактивности и долговечности неподвижных соединений, восстановленных акриловым адгезивом и ПКМ на его основе, 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. Виброактивность измеряли виброметром ВК-5.

При исследовании долговечности клеевых соединений и подшипников 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.

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований и их анализ» приведены результаты исследования полимеризации, деформационно-прочностных свойств пленок и неподвижных соединений акрилового адгезива АН-105 и ПКМ на его основе, теплообразования, виброактивности и долговечности подшипниковых узлов, восстановленных акриловым адгезивом АН-105 и ПКМ на его основе.

Исследование деформационно-прочностных свойств пленок полимер-полимерной композиции на основе адгезива АН-105. Исследованиями установлено, что наибольшими значениями деформационно-прочностных свойств обладают пленки композиции при концентрации эластомера Ф-40 в 12 масс. ч. Прочность составляет 16,2 МПа, что на 43,3 % превышает прочность пленок не наполненного АН-105 (11,3 МПа). Максимальное удлинение пленок композиции составляет 23,3%, что в 1,32 раза превышает удлинение пленок не наполненного АН-105 (17,6 %). Удельная работа деформации составляет 4,62

МДж/м³, что на 43,9% превышает удельную работу деформации пленок не наполненного АН-105 (3,21 МДж/м³).

Исследование деформационно-прочностных свойств клеевых соединений и определение оптимального состава полимер-полимерной композиции на основе адгезива АН-105. Исследованиями установлено, что наиболее высокие значения деформационно-прочностных свойств имеют клеевые соединения, выполненные композицией на основе АН-105 с концентрацией эластомера Ф-40 в 12 масс.ч. Прочность соединений при аксиальном сдвиге составляет 17,1 МПа, что на 35,7 % превышает прочность соединений не наполненного АН-105 (12,6 МПа). Максимальная деформация составляет 25,6%, что в 1,8 раза превышает показатель соединений не наполненного АН-105 (14,3 %). Удельная работа деформации составляет 4,76 МДж/м³, что на 70% превышает показатель соединений не наполненного АН-105 (2,8 МДж/м³).

Исследование модуля механических потерь акрилового адгезива АН-105 и полимер-полимерной композиции на основе адгезива АН-105. Эксперимент показал, что модуль механических потерь не наполненного адгезива АН-105 составляет 2,313 МПа. Модуль механических потерь композиции на основе адгезива АН-112 меньше на 54% и составляет 1,067 МПа.

Исследование процесса полимеризации клеевых соединений полимер-полимерной композиции на основе адгезива АН-105 при различных условиях отверждения. Исследования показали, что композиция на основе адгезива АН-105 имеет высокую скорость полимеризации и время отверждения, при которой образуется сшитый полимер, и составляет 3; 2,5 и 2 ч при температурах 20; 30 и 40 °С, соответственно.

Исследование прочности клеевых соединений полимер-полимерной композиции на основе адгезива АН-105. Исследована зависимость прочности клеевых соединений при аксиальном сдвиге от толщины клеевого шва. Прочность клеевых соединений составляет 19,6; 18,47 и 16,8 МПа при толщине клеевого шва 0,05; 0,1 и 0,15 мм соответственно. Снижение прочности можно объяснить масштабным фактором. Чем больше толщина клеевого шва, то есть объем полимерного материала, тем больше вероятность появления в нем пор, микротрещин и других дефектов, являющихся причиной снижения прочности.

Стендовые испытания подшипниковых узлов восстановленных акриловым адгезивом АН-105 и полимер-полимерной композицией на основе адгезива АН-105. Исследование долговечности неподвижных соединений подшипников качения восстановленных полимер-полимерной композицией на основе адгезива АН-105. Исследования показали, что введение эластификатора увеличивает выносливость и соответственно долговечность восстановленных подшипниковых узлов при циклических нагрузках. Максимальная допустимая толщина клеевого шва акрилового адгезива АН-105 $h = 0,125$ мм, а композиции на его основе $h = 0,15$ мм (рисунок 1).

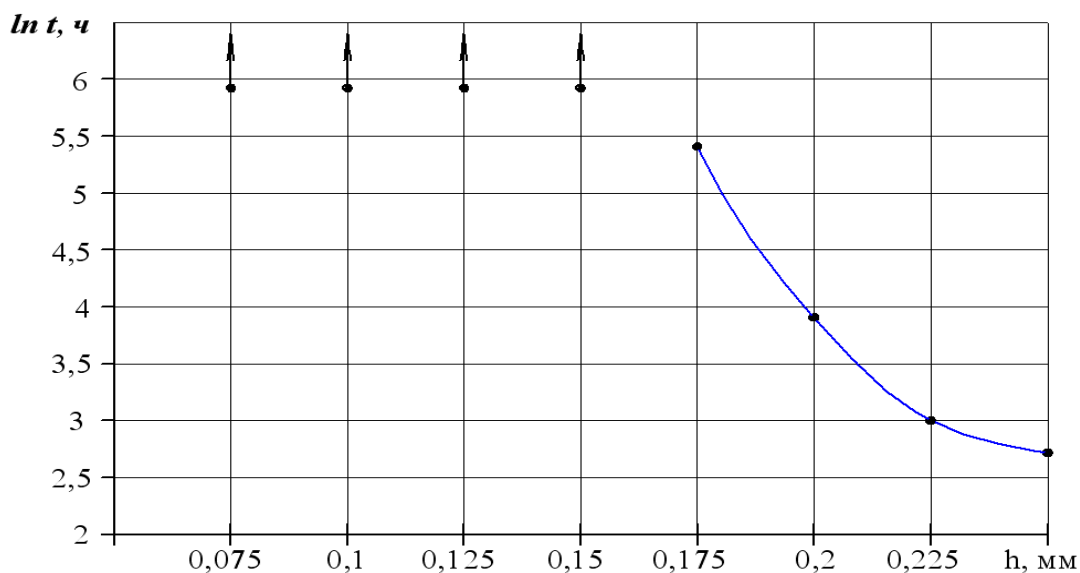


Рисунок 1 – Зависимость долговечности t неподвижных соединений подшипников 209 от толщины клеевого шва композиции адгезива АН-105 при радиальной нагрузке 20 кН

Исследование теплового баланса и виброактивности подшипниковых узлов восстановленных акриловым адгезивом АН-105 и полимерполимерной композицией на основе адгезива АН-105. Температура наружного кольца подшипникового узла восстановленного адгезивом АН-105 составляет 36, 39 и 44 °С при нагрузках 9,9; 15,8 и 20,0 кН соответственно. Температура наружного кольца подшипникового узла восстановленного композицией на основе адгезива АН-105 составляет 33, 35 и 39 °С при тех же нагрузках, что на 8,4; 11,3 и 11,4% меньше чем у не наполненного адгезива. Температура втулки подшипникового узла восстановленного адгезивом АН-105 составляет 52, 58 и 68 °С при нагрузках 9,9; 15,8 и 20,0 кН. Температура втулки подшипникового узла восстановленного композицией на основе адгезива АН-105 составляет 51, 56 и 61 °С при тех же нагрузках, что на 2; 3,5 и 11,3% меньше чем у чистого адгезива. Введение эластификатора существенно снижает теплообразование в клеевом шве, о чем свидетельствует более низкая температура деталей подшипникового узла по сравнению с ненаполненным адгезивом.

Амплитуда вибрации подшипникового узла восстановленного адгезивом АН-105 составляет 1,016; 1,045 и 1,096 мм при нагрузках 9,9; 15,8 и 20,0 кН соответственно. Амплитуда вибрации подшипникового узла восстановленного композицией на основе адгезива АН-105 составляет 0,974; 0,984 и 0,998 мм при тех же нагрузках, что на 4,1; 5,9 и 9% меньше чем у ненаполненного адгезива (рисунок 2).

Исследование долговечности подшипников качения при циркуляционном нагружении колец подшипников. Результаты эксперимента показаны на рисунке 3.

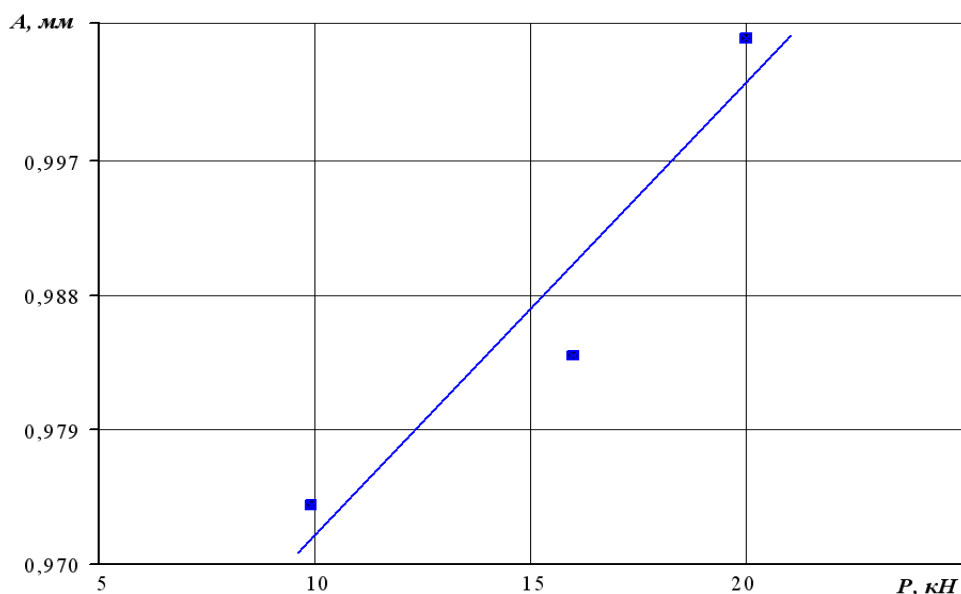
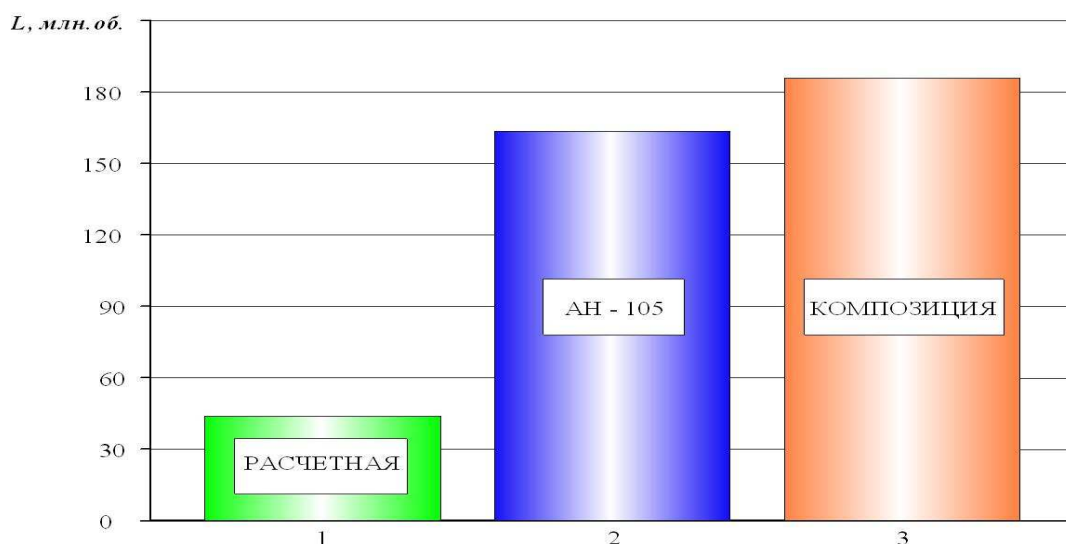


Рисунок 2 – Зависимость амплитуды вибрации А подшипникового узла, восстановленного композицией адгезива АН-105 от радиальной циклической нагрузки Р



1 – расчетная; 2 – восстановленного акриловым адгезивом АН-105; 3 – восстановленного композицией адгезива АН-105

Рисунок 3 – Долговечность L подшипника 209 при циркуляционном нагружении наружного кольца:

Долговечность подшипника восстановленного акриловым адгезивом АН-105 составила 162,18 млн.об., что в 3,7 раза превышает расчетную, а долговечность подшипника восстановленного полимер-полимерной композицией на основе адгезива АН-105 составила 186,72 млн.об., что на 15% превышает долговечность подшипника, восстановленного не наполненным адгезивом АН-105 и в 4,4 раза превышает расчетную (42,56 млн.об.).

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 подшипников качения композицией на основе акрилового адгезива АН-105, которая содержит следующие операции: очистка посадочных мест деталей соединения; измерение посадочных мест деталей для определения износа; обезжиривание посадочных мест деталей; приготовление композиции; нанесение композиции на посадочные места деталей и сборка соединения; отверждение клеевого соединения; контроль качества склеивания.

Разработанная технология восстановления неподвижных соединений подшипников качения композицией на основе акрилового адгезива АН-105 внедрена в ОАО «Большие Избищи» Данковского районов Липецкой области. Для оценки надежности восстановленных неподвижных соединений подшипников качения с февраля 2010 г. по сентябрь 2011 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 МичГАУ при изучении дисциплин «Технология ремонта машин» и «Монтаж, эксплуатация и ремонт технологического оборудования» и ФГБОУ ВПО ЛГТУ при изучении дисциплины «Надежность, эксплуатация и ремонт металлургического оборудования».

Расчеты показали экономическую эффективность технологии восстановления неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники композицией на основе акрилового адгезива АН-105. Годовой экономический эффект от внедрения технологии восстановления в ОАО «Большие Избищи» Данковского районов Липецкой области составил около 240 тыс. руб.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Теоретическими исследованиями установлены условия совместимости полимеров. Использование в качестве наполнителя раствора эластомера способствует образованию однородной фазы в виде полимерной матрицы и равномерно распределенного в ней эластомера. Эластификация «жесткого» полимера повышает его ударную прочность, выносливость, уменьшает теплообразование и амплитуду деформации при циклическом нагружении. Уменьшение модуля упругости приводит к снижению виброактивности, контактных напряжений и повышению долговечности подшипников качения.

2. Определен оптимальный состав полимер-полимерной композиции на основе адгезива АН-105: акриловый адгезив АН-105 – 100 масс.ч.; эластомер Ф-40 – 12 масс.ч. Введение раствора эластомера Ф-40 повышает деформационно-прочностные свойства материала и клеевых соединений. Удельная работа деформации при разрыве пленок композиции на основе адгезива АН-105 превышает на 43,9% аналогичный показатель не наполненного адгезива АН-105 и составляет 4,62 МДж/м³. Удельная работа деформации при аксиальном сдвиге клеевых соединений композиции на основе адгезива АН-105 превышает на 70%

аналогичный показатель соединений не наполненного адгезива АН-105 и составляет 4,76 МДж/м³. При введении эластификатора повышаются упругие свойства адгезива АН-105 и снижается модуль механических потерь. Модуль механических потерь адгезива АН-105 составляет 2,313 МПа. Модуль механических потерь композиции на основе адгезива АН-112 меньше на 54% и составляет 1,067 МПа.

3. Исследованиями установлено, что время отверждения композиции составляет 3; 2,5 и 2 ч при температурах 20; 30 и 40 °С, соответственно.

4. Исследованиями установлено, что прочность клеевых соединений полимер-полимерной композиции на основе адгезива АН-105 зависит от толщины клеевого шва. Максимальную прочность 19,6 МПа имеют клеевые соединения с толщиной клеевого шва 0,05 мм. Прочность с увеличением толщины клеевого шва до 0,1 и 0,15 мм снижается до 18,47 и 16,8 МПа соответственно. Введение эластификатора увеличивает выносливость, и соответственно долговечность восстановленных подшипниковых узлов при циклических нагрузках. Максимальная допустимая толщина клеевого шва при восстановлении неподвижных соединений адгезивом АН-105 составляет 0,125 мм, а композиции на его основе – 0,15 мм.

5. При эластификации «жестких» полимеров существенно снижается теплообразование в клеевом шве. Температура деталей подшипникового узла, восстановленного композицией на основе адгезива АН-105 до 7°С ниже по сравнению с ненаполненным адгезивом. Подшипниковый узел, восстановленный полимер-полимерной композицией на основе адгезива АН-105 имеет меньшую амплитуду вибрации, благодаря уменьшения модуля упругости при введении эластификатора. Амплитуда вибрации подшипникового узла восстановленного композицией на основе адгезива АН-105 составляет 0,974; 0,984 и 0,998 мм при нагрузках 9,9; 15,8 и 20,0 кН соответственно, что на 4,1; 5,9 и 9% меньше чем у ненаполненного адгезива.

6. Введение эластификатора в «жесткий» полимер приводит к большей деформации желоба наружного кольца, увеличению площади пятна контакта с нагруженными телами качения, повышению коэффициента распределения нагрузки и снижению контактных напряжений. Долговечность подшипника при восстановлении неподвижных соединений полимер-полимерной композицией на основе адгезива АН-105 составила при циклическом нагружении 186,72 млн.об., что в 4,4 раза превышает расчетную и на 15% выше чем у ненаполненного полимера.

7. На основе результатов исследований разработана технология восстановления неподвижных соединений подшипников качения полимер-полимерной композицией на основе акрилового адгезива АН-105, которая внедрена в ОАО «Большие Избищи» Данковского районов Липецкой области. Годовой экономический эффект от внедрения новой технологии составил около 240 тыс. руб.

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

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1 **Бутин, А. В.** Восстановление полимер-полимерной композицией и неразрушающий контроль неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники [Текст] / Ли Р. И., Бутин А. В., Шипулин М. А. // Вестник МичГАУ. – 2010. – №1. – С.181-185.

2 **Бутин, А.В.** Перспективные полимерные и полимер-полимерные композиционные материалы для сборки подшипниковых узлов при изготовлении и ремонте техники [Текст] / Ли Р. И., Бочаров А. В., Бутин А.В., Шипулин М. А. // Клеи. Герметики. Технологии. – № 5, 2011 г., С . 28 – 33.

3 **Бутин, А. В.** Повышение эффективности акрилового адгезива АН-105 при восстановлении неподвижных соединений подшипников качения [Текст] / Ли Р. И., Щетинин М. В., Бутин А. В., Шипулин М. А. // Вестник МичГАУ. – 2011. – №1 Ч. 1 – С. 214-217.

В сборниках научных трудов и материалах конференции:

4 **Бутин, А.В.** Увеличение деформационно-прочностных свойств акрилового адгезива АН-105 при введении эластификатора Ф-40 [Текст] / Ли Р. И., Бутин А. В. // XIII международная научно-производственная конференция: Проблемы сельскохозяйственного производства на современном этапе и пути их решения. - Белгород, 2009. – Изд-во Белгородской ГСХА. С. 199.

5 **Бутин, А.В.** Повышение деформационно-прочностных свойств акрилового адгезива АН-105 при введении эластификатора [Текст] / Ли Р. И., Бутин А. В., // XV международная научно-практическая конференция: Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – Новые технологии и техника для растениеводства и животноводства. ГНУ ВИИТИН. – Тамбов.: Изд-во Першина Р. В., 2009. С. 587-591.

6 **Бутин, А.В.** Повышение деформационно-прочностных свойств жестких полимеров при введении эластификатора [Текст] / Ли Р. И., Бутин А.В. // Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК: сб. науч. тр. Междунар. науч.практ. конф. 4-5 мая 2009 г. – Мичуринск: Изд-во Мичуринского ГАУ. – 2009. – С. 40 – 44.

7 **Бутин, А. В.** Клей для соединения однородных изделий из металла, стекла, пластмасс и керамики [Текст]: Патент на изобретение № 2418025 РФ Заявл. 29.05.2009 / Ли Р. И., Кондрашин С. И., Бутин А. В., Шипулин М. А. // Опубл. 10.12.2010. – Бюл. № 34.

8 **Бутин, А.В.** Деформационно-прочностные свойства полимер-полимерной композиции для восстановления неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники [Текст] / Ли Р. И., Бутин А.В. // Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК: сб. науч. тр. Междунар. науч.практ. конф. 13-14 мая 2010 г. – Мичуринск: Изд-во Мичуринского ГАУ. – 2011. – С. 169 – 174.

9 **Бутин, А.В.** Технология восстановления неподвижных соединений под-

шипников сельскохозяйственной техники полимер-полимерной композицией на основе адгезива АН-105 [Текст] / Ли Р. И., Бутин А. В., Шипулин М. А. // XVI международная научно-практическая конференция: Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – Новые технологии и техника для растениеводства и животноводства. ГНУ ВИИТИН. – Тамбов.: Изд-во Першина Р. В., 2011. С. 230-232.

10 **Бутин А.В.** Перспективные полимер-полимерные и нано-полимерные композиционные материалы для соединений деталей при изготовлении и ремонте машин [Текст] / Ли Р.И., Кондрашин А.В., Бутин А.В., Шипулин М.А. // XV международная научно-производственная конференция: Проблемы сельскохозяйственного производства на современном этапе и пути их решения. – Белгород.: Изд-во Белгородской ГСХА, 2011. С. 207.

11 **Бутин, А. В.** Композиция для склеивания металлических изделий [Текст]: Патент на изобретение № 2430945 РФ Заявл. 29.05.2009 / Ли Р. И., Кондрашин С. И., Бочаров А. В., Бутин А. В. // Оpubл. 10.10.2011. – Бюл. № 28.