

На правах рукописи

Борисова

Борисова Екатерина Александровна

**ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МЕХАНИЗМА ПОДАЧИ
ПРУЖИНОНАВИВОЧНЫХ АВТОМАТОВ МАГНИТНОЙ
ОБРАБОТКОЙ**

05.02.02 – Машиноведение, системы приводов
и детали машин

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2021

Работа выполнена в Муромском институте (филиале) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Зелинский Виктор Васильевич

Официальные оппоненты: **Памфилов Евгений Анатольевич**,
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ, федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Брянский
государственный технический университет»,
заведующий кафедрой «Триботехнические
материалы и технологии материалов»

Анцев Виталий Юрьевич,
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Тульский государственный
университет», заведующий кафедрой
«Подъемно-транспортные машины и
оборудование»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Московский автомобильно-
дорожный государственный технический
университет»

Защита состоится 14 октября 2021 г. в 13 часов 00 мин на заседании диссертационного совета Д 218.005.01 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), www.rut-miit.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета  Воронин Николай Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В пружинонавивочных автоматах, используемых в серийном производстве пружинных блоков для мебельной продукции, деталями с недостаточной долговечностью рабочих поверхностей являются подающие ролики механизма подачи пружинной проволоки. Ролики с проволокой образуют высшие кинематические пары с локальным контактом и осуществляют ее перемещение по принципу фрикционной передачи. К основным причинам низкой долговечности таких контактных пар относятся циклическая упругопластическая деформация сжатия и сдвига с высокими контактными напряжениями, недостаточная конструкционная прочность контактной поверхности легированных роликов, близкое строение кристаллических решеток взаимодействующих материалов и др.

Возможности термических и химико-термических методов повышения долговечности подающих роликов пружинонавивочных автоматов практически исчерпаны. Технологии, основанные на воздействии концентрированными потоками энергии, из-за высокой стоимости для небольших предприятий нерентабельны. Перспективным и доступным методом для них является магнитная обработка (МО) с относительно низкой напряженностью поля, которая успешно применяется в машиностроении для повышения долговечности контактных пар из инструментальных и конструкционных сталей. Однако для условий работы пружинонавивочных автоматов возможности магнитной обработки практически не исследованы, что свидетельствует об актуальности диссертационной работы.

Степень разработанности темы. В области механики контактного взаимодействия и разрушения контактных пар в машинах известны исследования Александрова В.М., Гаджиева В.Д., Галина Л.А., Горячевой И.Г., Демкина Н.Б., Джонсона К., Добычина М.Н., Зернина М.В., Иосилевича Г.Б., Кендала К., Коллинза Д., Колмогорова В.Л., Попова В.Л., Решетова Д.Н.

Вопросы изучения трансформации структуры и конструкционных свойств материалов как реакции на эксплуатационные воздействия отражены в работах Арзамасова Б.Н., Булгаревича С.Б., Буше Н.А., Ивановой В.С., Калина Б.А., Кима В.А., Куксеновой Л.И., Лахтина Ю.М., Лоладзе Т.Н., Любарского И.М., Машкова Ю.К., Осташева В.В., Рыбаковой Л.М., Семенова А.П., Фридмана Я.Б., Хайнике Г.

Изучение возможностей повышения долговечности деталей машин магнитной обработкой рассмотрено в работах Галяя М.Т., Кантовича Л.И., Малыгина Б.В., Памфилова Е.А., Первова К.М., Полетаева В.А., Постникова С.Н., Пырикова П.Г.

Объект исследования – контактная пара «легированная сталь – углеродистая сталь», образуемая приводным роликом пружинонавивочного автомата (ПНА), изготавливаемого из сталей X12MФ и P6M5 с пружинной проволокой 65.

Предмет исследования – характеристики конструкционной прочности контактной пары «ролик – проволока» в ПНА в условиях эксплуатации и при применении к ним магнитной обработки.

Цель диссертационной работы повышение долговечности деталей механизма подачи пружинонавивочных автоматов на основе магнитной обработки подающих роликов, изготовленных из сталей X12MФ и P6M5, обеспечивающей более эффективное использование потенциала конструкционной прочности применяемого материала с низкими затратами при повторяющихся циклах «пуск – останов» подающего механизма.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- теоретическое моделирование детерминированных физико-химических процессов в контактной паре «ролик – проволока» на стадии эксплуатации и влияния магнитной обработки на эти процессы;

- разработка методики и проведение тестовых испытаний для оценки принятого режима магнитной обработки исследуемых легированных сталей для роликов;

- разработка экспериментального метода оценки влияния магнитной обработки на характеристики конструкционной прочности контактной пары «ролик – проволока»;

- экспериментально-теоретическое установление механизма влияния магнитной обработки на процессы адгезионно-диффузионного массопереноса в контактной паре «ролик – проволока»;

- разработка экспериментального метода оценки влияния магнитной обработки на показатели массопереноса в исследуемой контактной паре;

- разработка расчетных методов оценки влияния магнитной обработки на повышение несущей способности и долговечности подающих роликов ПНА.

Научная новизна состоит в следующем:

- разработан механизм влияния магнитной обработки на процесс диффузионно-адгезионного массопереноса в контактной паре «ролик – проволока» механизма подачи;

- установлен новый металлофизический эффект, состоящий в том, что у намагниченного до насыщения поверхностного слоя подающих роликов, изготовленных из легированных сталей X12МФ и Р6М5, при частичном буксовании в процессе повторяющихся циклов «пуск – останов» механизма подачи многократно (до 20 раз) замедляется диффузионно-адгезионный массоперенос углерода и легирующих элементов из поверхностного слоя ролика в сопряженную поверхность проволоки из стали 65, обеспечивающий снижение возможности образования твердых вторичных микроструктур с абразивными свойствами на поверхности проволоки и снижение интенсивности схватывания взаимодействующих поверхностей, повышающие, тем самым, долговечность роликов по критерию износостойкости;

- разработана методика определения давления начала текучести в поверхностном слое подающих роликов механизма подачи

пружинонавивочных автоматов с учетом сдвигающей силы и относительной деформации;

- разработан экспериментальный метод оценки влияния магнитной обработки на показатели массопереноса в контактной паре в лабораторных условиях.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что:

- установлена природа процессов, влияющих на несущую способность и долговечность контактной пары «ролик – проволока» подающего механизма пружинонавивочных автоматов;

- установлен эффект понижения интенсивности изнашивания и схватывания в скользящем контакте подающих роликов, изготовленных из сталей Х12МФ и Р6М5, с проволокой их стали 65 при магнитной обработке роликов с относительно невысокой напряженностью магнитного поля;

- разработан метод расчетной оценки влияния магнитной обработки на повышение нагрузки начала пластического течения в поверхностном слое подающих роликов в условиях контакта без сдвига и со сдвигом, позволяющий прогнозировать повышение несущей способности и долговечности контактной поверхности деталей механизма подачи пружинонавивочных автоматов;

- получен положительный результат по повышению долговечности подающих роликов при апробации метода магнитной обработки подающих роликов пружинонавивочных автоматов в условиях производственного предприятия.

Методология и методы исследования. В диссертационной работе использованы системный анализ условий эксплуатации объекта исследования, справочной и научно-технической литературы по направлению исследования. Применены методы теоретического и экспериментального моделирования исследуемых процессов. Применены современные инструментальные методы оценки результатов экспериментов: оценка химического состава по результатам оптико-эмиссионного и рентгеновского спектрального анализа, оптическая и

электронная микроскопия, измерение микротвердости, взвешивание на лабораторных аналитических весах. Проводилась компьютерная обработка в Mathcad.

Положения, выносимые на защиту:

- металлофизический механизм, описывающий впервые установленный для намагниченных до насыщения исследованных легированных сталей эффект многократного замедления в контакте со сдвигом диффузионно-адгезионного переноса углерода и легирующих элементов Cr, Mo, W, V в сопряженную углеродистую сталь 65;

- результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния магнитной обработки легированных сталей X12МФ и Р6М5 на долговечность контактной пары «легированная сталь – углеродистая сталь»;

- модель детерминированных физико-химических преобразований в условиях механоактивации и дезактивации в подвижной контактной паре «легированная сталь – углеродистая сталь», учитывающая влияние магнитной обработки исследованных легированных сталей.

Степень достоверности результатов диссертационной работы обеспечивается использованием основных положений фундаментальных дисциплин в области машиноведения и материаловедения, научно обоснованных методик экспериментальных исследований, современных методов и средств для оценки характеристик объекта исследования, апробацией полученных результатов в производственных условиях.

Апробация работы проведена в форме научных докладов и дискуссий по основным результатам диссертации на следующих конференциях:

- 18 Международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии в машиностроении – 2013», БГИТА, Брянск. Октябрь 2013 г.;

- Юбилейной XXV Международной инновационно-ориентированной конференции молодых ученых и студентов (МИКМУС-2013), Москва, 13-15 ноября 2013 г.;

- X mezinárodní vědecko - praktická konference "Moderní vymoženosti vědy - 2014", 27.01.2014–05.02.2014, Praha, 2014;
- II Международной научно-практической конференции «Современные тенденции развития науки и технологий», Белгород, 31 мая 2015; Тамбов;
- VII Всероссийской межвузовской научной конференции «Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России» (6 февраля 2015 г., Муромский институт Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Муром 2015 г.);
- VIII Всероссийской межвузовской научной конференции «Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России» (5 февраля 2016 г., Муромский институт Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Муром 2016 г.);
- XIII Всероссийской межвузовской научной конференции «Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России» (5 февраля 2021 г., Муромский институт Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Муром 2021 г.).

Внедрение результатов работы. Результаты исследований апробированы и внедрены на промышленном предприятии ООО «ПК Торис-Групп». Использованы в 3-х госбюджетных НИР, а также внедрены в учебный процесс Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы из 154 наименований. Общий объем работы составляет 171 страницу, включая 39 рисунков, 10 таблиц и 3 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе проведен анализ условий работы деталей пружинонавивочных автоматов и показано, что ролики с проволокой образуют традиционную контактную пару «легированная сталь – углеродистая сталь». Микроскопическим изучением поврежденных контактных поверхностей подающих роликов установлено наличие микроцарапин, микрорисок и микровырывов, возникших от сдвиговых воздействий твердыми микровыступами вторичного происхождения, расположенными на поверхности проволоки, и от схватывания кристаллических решеток. Благоприятные условия для возникновения микроповреждений создаются при частичном буксовании роликов в моменты повторяющихся циклов «пуск-останов» в нагруженном состоянии для отрезки готовых пружин в соответствии с циклограммой работы автоматов.

Показано, что основным критерием конструкционной прочности подающих роликов является долговечность как свойство изделия сохранять работоспособность до предельного состояния. При этом обеспечивающими долговечность свойствами материала роликов является контактная прочность и износостойкость. Анализ условий работы и исследований по повреждаемости контактных пар показал, что на стадии эксплуатационного нагружения для контактной пары «ролик – проволока» возможен адгезионно-диффузионный перенос углерода и карбидообразующих элементов из ролика на поверхность проволоки с образованием на ней вторичных твердых структур с абразивными свойствами, повреждающими ролик в моменты циклов «пуск-останов».

Рассмотрена механика зарождения пластического течения и разрушения в поверхностном слое при контактном нагружении, которая позволяет оценивать долговечность контактной поверхности по нагрузке начала текучести материала ролика при эксплуатационном нагружении. При этом

определяющими являются приведенный модуль упругости и величина сдвигающей силы в контактной области.

Проведенный анализ возможностей магнитной обработки слабым полем показал, что ее использование для подающих роликов может оказать положительный эффект за счет

- повышения структурной устойчивости их поверхностного слоя благодаря замедлению диффузии и адгезии углерода и карбидообразующих элементов, являющихся реагентами вторичных прочных структур на проволоке;

- снижения величины сдвигающей силы в контакте ролика с проволокой благодаря уменьшению прочности и плотности связей из-за схватывания.

Отмечается, что в расчетной практике проектирования деталей машин отсутствуют инженерные методы оценки влияния магнитной обработки на повышение несущей способности контактных пар, что сдерживает распространение этого перспективного физического метода.

Во втором разделе представлено теоретическое моделирование физико-химических процессов в контактной паре ролик – проволока в исходных условиях работы и влияние на эти процессы магнитной обработки роликов.

Вследствие локализации деформаций в очень тонких слоях энергетическое состояние последних соответствует чрезвычайно высокой механоактивации. Из-за этого в очагах соприкосновения решеток ролика и проволоки создается неустойчивое структурно-энергетическое состояние. В соответствии с предлагаемой гипотезой в межрешеточном пространстве образуется промежуточный контактный микрообъем (ПКМ) с измененными свойствами, в котором происходит обмен веществом и энергией по законам термодинамики. В результате установившегося квазижидкого состояния в пределах ПКМ резко повышается реакционная способность атомов и электронов и активизируются процессы массопереноса и дезактивации за счет диффузии и адгезии, в основном, по следующим каналам:

- диффузионный перенос карбидообразующих химических элементов на поверхность проволоки и образование в нем твердых вторичных структур в виде карбидных фаз и интерметаллидов;

- схватывание, перенос и закрепление на поверхности проволоки фрагментов решетки ролика вместе с частицами карбидов;

Последовательность прохождения детерминированных физико-химических процессов в контактной паре «ролик – проволока» за период контакта и влияние магнитной обработки на эти процессы представлена на рисунке 1.

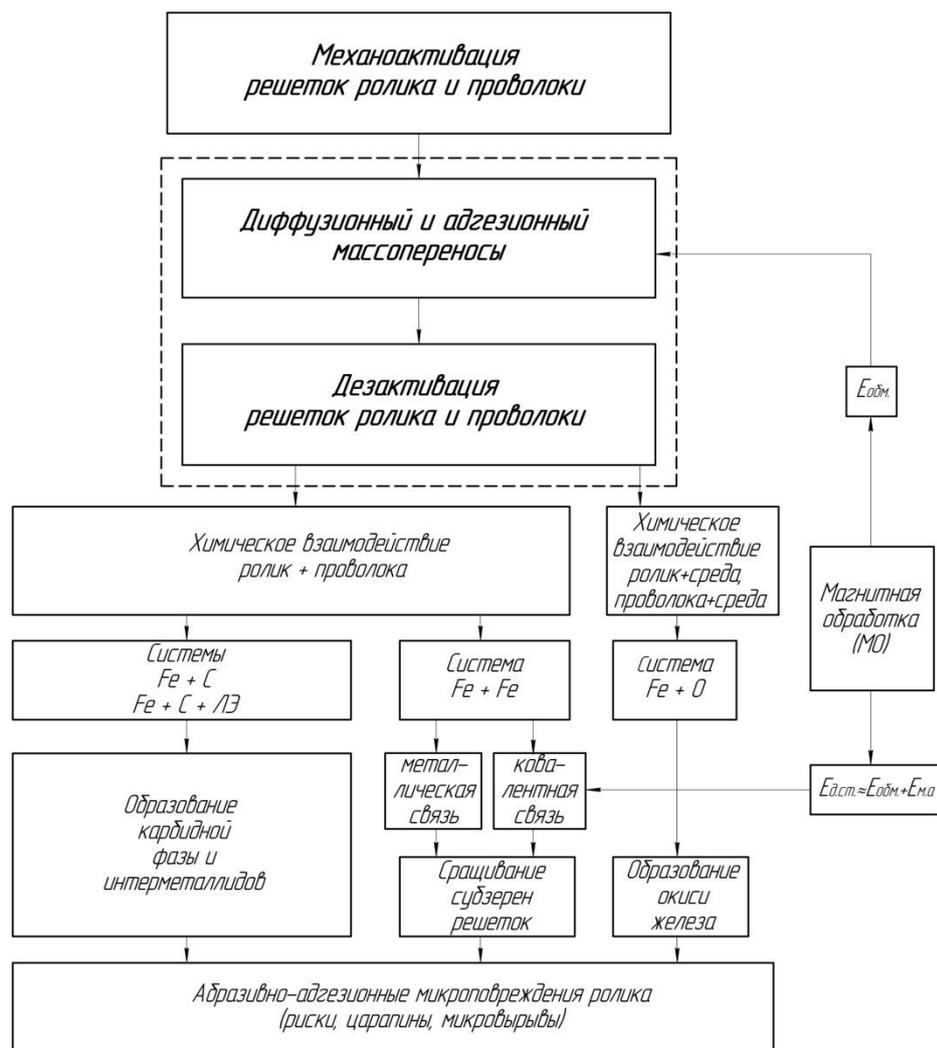


Рисунок 1 - Схема прохождения детерминированных физико-химических процессов в контактной паре «ролик – проволока» за период контакта и влияние магнитной обработки на эти процессы

Вторичные структуры в виде карбидных фаз и интерметаллидов, а также частицы карбидов из ролика, перенесенные в проволоку в результате

схватывания решеток, оказывают на поверхность ролика абразивное воздействие.

В работе представлены основные квантовохимические условия, необходимые для образования прочной ковалентной связи при схватывании атомов Fe-Fe из решеток ролика и проволоки. Показана повышенная возможность образования схватывания в исходных условиях работы роликов (без МО) и значительное снижение этой возможности в результате обработки ролика магнитным полем.

Показано, что у намагниченного ролика в сбалансированной энергии доменных стенок основную долю представляет энергия обменного взаимодействия квантово-механической природы, возникающая в ферромагнетиках. В соответствии с физикой твердого тела эта энергия короткодействующая (в пределах периода решетки), но достаточно высокая. При этом атомы легирующих элементов оказываются в локальном энергетическом минимуме. Возникший энергетический барьер препятствует их диффузионно-адгезионному переносу из решетки ролика в решетку проволоки и образованию твердых вторичных структур в виде карбидных фаз и интерметаллидов. Предполагается, что причинами этого могут быть:

- 1 возросший уровень энергии активации диффузии в решетке ролика в связи с образованием возросшего энергетического барьера для переноса легирующих элементов. Поэтому их диффузионного перескока в решетку проволоки не происходит;

- 2 образовавшаяся разница в энергиях у атомов железа в ролике и проволоке, которая препятствует образованию прочной ковалентной связи между ними. Поэтому схватывания с образованием прочной связи и вырыва фрагмента решетки ролика вместе с легирующими элементами не происходит.

Рассмотрен механический аспект пластического течения и поверхностного разрушения подающих роликов на основе гипотезы Джонсона для контакта за пределами упругости. Разработаны методы оценки влияния

магнитной обработки на величину нагрузки зарождения текучести в поверхностном слое.

Для контакта без сдвига предложена формула, позволяющая дать оценку относительного повышения нагрузки начала текучести F_T за счет понижения приведенного модуля упругости контакта $E_{пр}$ в результате магнитной обработки.

$$K_E = \frac{F_T^{MO}}{F_T^{исх}} = \frac{\left(E_{пр}^{исх}\right)^2}{\left(E_{пр}^{MO}\right)^2}, \quad (1)$$

где $F_T^{исх}$, F_T^{MO} – нагрузка начала текучести для контакта без сдвига, соответственно, в исходных условиях и в условиях МО;

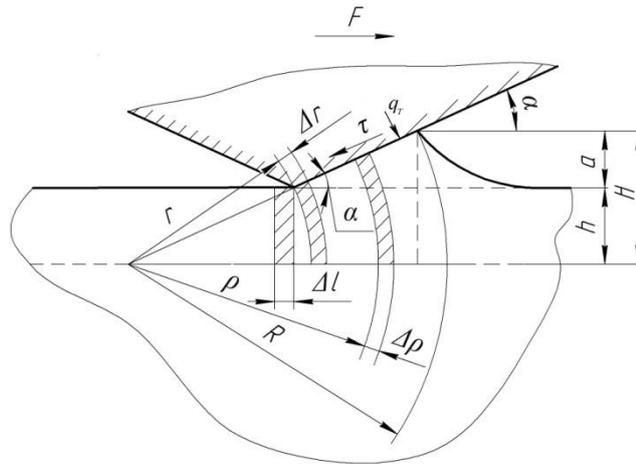
$E_{пр}^{исх}$, $E_{пр}^{MO}$ – приведенные модули упругости контакта, соответственно, в исходных условиях и в условиях МО.

Для контакта со сдвигом предложено развитие гипотезы Джонсона для инженерного использования. Для учета негативного влияния возникающей из-за схватывания сдвигающей силы на нагрузку начала текучести проводилось математическое моделирование напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя роликов. Моделирование осуществляли для геометрических и прочностных условий контакта единичного среднестатистического микровыступа на проволоке с материалом ролика с использованием теории обработки металлов давлением.

За эквивалент микровыступа был принят жесткий конус, движущийся по жесткопластическому полупространству (рисунок 2). При этом наружный слой материала полупространства толщиной h вместе с уступом высотой a находятся в начале пластического течения.

При сдвиге между конусом и полупространством действуют нормальное давление q_T и удельная сила трения τ , нормированная показателем μ относительно предела текучести σ_T деформируемого полупространства.

В расчетах применялся метод баланса работ пластической деформации единичного микрообъема с использованием условия пластичности Треска.



α – угол контакта; a – высота пластически деформированного уступа; h – глубина пластически деформированного слоя; ρ – радиус-вектор; R – радиус внешней границы очага деформирования; r – радиус внутренней границы очага деформирования; F – внешняя движущая сила; Δr , $\Delta \rho$ – толщины элементарных слоев; Δl – элементарное перемещение конуса; q_T – внешнее давление, инициирующее пластическое течение; τ – удельная сила трения

Рисунок 2 - Расчётная схема к модели взаимодействия жесткого конуса с жестко-пластическим полупространством в начале пластического течения при плоском деформированном состоянии

$$A_F = A_D + A_T, \quad (2)$$

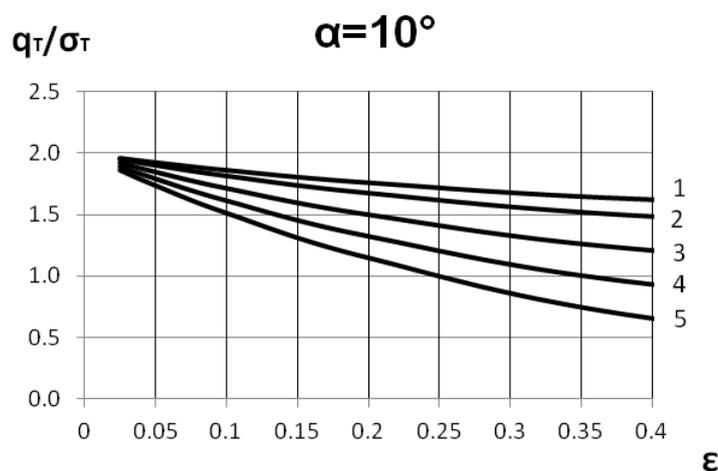
где A_D – работа деформации материала; A_T – работа удельной силы трения на контактной поверхности; A_F – работа внешней силы.

Результаты численной реализации уравнения баланса работ в зависимости от относительной деформации ε в наиболее близких к практике условиях (с углом контакта $\alpha = 10^\circ$) представлены на рисунке 3 при ряде значений показателя трения μ ($\mu_1 = 0,05$; $\mu_2 = 0,1$; $\mu_3 = 0,2$; $\mu_4 = 0,3$; $\mu_5 = 0,4$).

Оценку влияния магнитной обработки по кратности повышения нагрузки зарождения текучести в поверхностном слое для контакта со сдвигом предложено проводить по формуле

$$K_{F.сд} = \frac{\left(E_{пр}^{исх}\right)^2}{\left(E_{пр}^{МО}\right)^2} \cdot \left(\frac{q_T^{МО}}{q_T^{исх}}\right)^3, \quad (3)$$

где $q_T^{\text{исх}}$, $q_T^{\text{МО}}$ – давление начала пластического течения, соответственно, в исходных условиях и в условиях МО.



1 – $\mu_1=0,05$; 2 – $\mu_2=0,1$; 3 – $\mu_3=0,2$; 4 – $\mu_4=0,3$; 5 – $\mu_5=0,4$

Рисунок 3 – Зависимости относительного давления начала текучести q_T/σ_T от относительной деформации ϵ и показателя трения μ

В результате показано, что применение МО проявляется в двух направлениях:

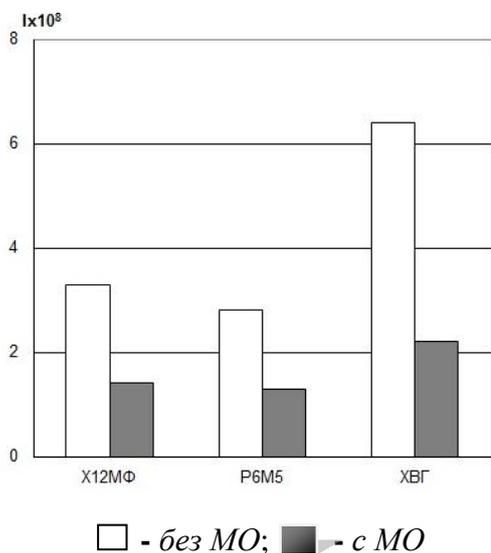
- в снижении приведенного модуля упругости контакта, что обеспечивает повышение $K_{F.CД}$ и долговечности на 70 % (или в 1,7 раза);
- в совместном снижении трения и деформации (т.е. повышения K_q), что на каждые 20 % повышения K_q обеспечивает повышение $K_{F.CД}$ и долговечности на 50...70 % (или в 1,5...1,7 раза).

В целом кратность повышения нагрузки начала текучести в контактной паре может достигать 6,9 раза.

В третьем разделе обоснованы формы и размеры образцов, методы испытаний. Представлено описание экспериментального оборудования и приборов для инструментальной оценки экспериментальных результатов (модернизированная машина трения, намагничивающая установка, лабораторные аналитические весы, микротвердомер ПМТ-3М с электронно-вычислительным устройством, оптико-эмиссионного спектрометр

Q4 TASMAN, растровый электронный микроскоп «JSM-6380 LA», оснащенный микрорентгеноспектральным анализатором «Analysis Station»).

В четвертом разделе приведены результаты экспериментальной оценки влияния магнитной обработки на повышение долговечности подающих роликов пружинонавивочных автоматов.



□ - без МО; ■ - с МО
Рисунок 4 – Влияние магнитной обработки в оптимальном режиме на интенсивность изнашивания образцов легированных сталей X12MF, P6M5 и XBG

Установлено существенное влияние МО на снижение интенсивности изнашивания подающих роликов (рисунок 4).

У поверхностей образцов из углеродистой стали (имитирующих проволоку), работавших в паре с образцами из легированных сталей без МО (имитирующих ролик), выявлено повышение микротвердости более, чем в 3 раза, по сравнению с исходной микротвердостью, что

указывает на химическую природу происхождения твердых вторичных структур на поверхности проволоки, т.к. для деформационного упрочнения такая кратность повышения микротвердости невозможна. При применении МО образцов из легированных сталей кратность повышения в результате трения микротвердости образцов из углеродистой стали по сравнению с исходной не превысила 1,5 раза.

Микротвердость поверхностей образцов из углеродистой стали после взаимодействия с образцами из легированных сталей без МО составила более 18 ГПа, что соответствует микротвердости карбидных фаз хрома, вольфрама и молибдена, образование которых возможно в результате переноса из легированных образцов в углеродистую сталь посредством диффузии и адгезии атомов легирующих элементов с последующим прохождением химических реакций.

Микроскопическим изучением контактных поверхностей испытанных образцов легированных сталей Х12МФ, Р6М5, ХВГ установлено, что применение МО уменьшает размеры и количество рисок и царапин на них, а также в 3...5 раз снижает масштабы их адгезионного схватывания с образцами из стали 65.

В результате экспериментальных исследований установлено, что поверхности образцов из углеродистой стали 65 после работы с образцами из легированных сталей Х12МФ, Р6М5, ХВГ без МО претерпевают существенные физико-химические преобразования, которые выражаются в образовании островковых твердых вторичных структур в поверхностном слое. На их наличие указывает выявленное (более, чем трехкратное) повышение микротвердости поверхности. Поэтому дополнительно проводилось экспериментальное установление принципиальной возможности диффузионно-адгезионного переноса карбидообразующих элементов из поверхности образцов легированных сталей в поверхностный слой образцов углеродистой стали путем оценки химического состава поверхности последнего после работы контактной пары без МО и при применении МО.

Выявление фактического переноса углерода и карбидообразующих элементов проводилось путем сравнения измененной в результате взаимодействия в контактной паре концентрации этих элементов (С, Cr, Mo, V, W) в поверхностном слое образца, имитирующего проволоку, с исходной концентрацией перечисленных элементов в нем. Оценка химического состава проводилась на оптико-эмиссионном спектрометре Q4 TASMANN фирмы Bruker.

На основе разработанного метода оценки влияния магнитной обработки на показатели массопереноса установлено, что в контактной паре «высоколегированная сталь – углеродистая сталь» при контактном взаимодействии в поверхностном слое углеродистой стали происходит повышение содержания углерода до 2,5 раз, карбидообразующих элементов от 2 до 15 раз за счет диффузионно-адгезионного массопереноса из легированной стали. Для оценки явлений массопереноса диффузией и адгезией предложена

удельная характеристика – скорость накопления прироста концентрации элементов во времени. Результаты оценки представлены на рисунке 5.

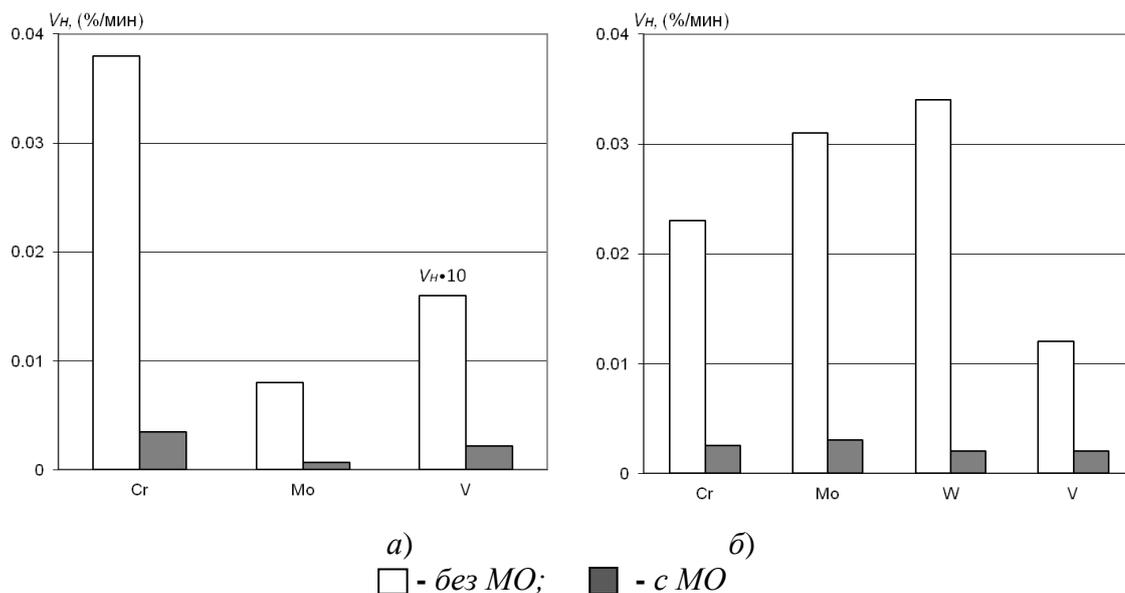


Рисунок 5 – Влияние МО на скорость накопления прироста концентрации легирующих элементов V_n в поверхностном слое ролика при работе в паре с образцом из сталей X12МФ (а) Р6М5 (б)

Установлено, что за счет МО скорость массопереноса может быть уменьшена: для углерода до 3-х раз, для карбидообразующих элементов в 7...20 раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе поставленная цель повышения долговечности деталей механизма подачи пружинонавивочных автоматов NPB-90 и SX-60 на основе магнитной обработки подающих роликов, изготавливаемых из сталей X12МФ, Р6М5, взаимодействующих с проволокой из стали 65, достигнута за счет следующих результатов.

1 Предложена теоретическая модель взаимодействия поверхностей в контактной паре «легированная сталь – углеродистая сталь», в которой для условий эксплуатационной механоактивации в виде совместной деформации «сжатие + сдвиг» и массопереноса показана и экспериментально подтверждена возможность образования на углеродистой стали островковых твердых вторичных структур, абразивным воздействием повреждающих сопряженную легированную сталь.

Микротвердость установленных вторичных структур достигает 18 ГПа, что соответствует микротвердости карбидных фаз на основе хрома, вольфрама и молибдена и интерметаллидов, их содержащих, образованных в результате диффузионно-адгезионного массопереноса углерода и легирующих элементов между взаимодействующими решетками.

2 Для конкретных условий применения изучен способ повышения долговечности легированных подающих роликов механизма подачи пружинонавивочных автоматов на основе магнитной обработки. Способ повышает структурную устойчивость поверхностного слоя роликов из сталей X12МФ, Р6М5 и снижает, тем самым, возможность образования за счет массопереноса на сопряженной с ними проволокой из стали 65 вторичных твердых структур с абразивными свойствами, повреждающих ролики.

3 Предложен механизм влияния магнитной обработки исследованных легированных сталей на процесс массопереноса в контактной паре «легированная сталь – углеродистая сталь», состоящий:

- в повышении у легированной стали энергетического порога для диффузии углерода и легирующих элементов в сопряженную углеродистую сталь;
- в создании разницы в энергиях у атомов железа в наружных слоях сопряженных решеток, что в соответствии с положениями квантовой химии, препятствует созданию прочных ковалентных связей между ними и, следовательно, локальному схватыванию решеток.

4 Разработан метод расчетной оценки влияния магнитной обработки на несущую способность подающих роликов и показано, что благодаря существенному замедлению массопереноса между сопряженными решетками несущая способность роликов может быть повышена:

- за счет снижения приведенного модуля упругости микровыступов в контакте до 1,7 раза;
- за счет дополнительного снижения совместного влияния сдвигающих сил и деформации в контакте до 6,9 раза.

5 Разработан экспериментальный метод оценки влияния магнитной обработки на характеристики конструкционной прочности контактной пары «легированная сталь – углеродистая сталь» и показано, что применение магнитной обработки легированной стали:

- снижает износ стали Х12МФ до 2,5 раз, стали Р6М5 до 2,3 раза, стали ХВГ до 2,9 раза;
- снижает масштабы локального адгезионного схватывания сопряженных решеток до 5 раз;
- снижает коэффициент трения в среднем на 25 %, который, в соответствии с механикой контактного взаимодействия, является фактором зарождения пластического течения и поверхностного разрушения.

6 Разработан экспериментальный метод оценки влияния магнитной обработки на показатели массопереноса. При этом:

- установлен новый металлофизический эффект, состоящий в том, что у поверхностного слоя намагниченных до насыщения исследованных легированных сталей при подвижном контакте многократно замедляется диффузионно-адгезионный перенос углерода и легирующих элементов Cr, Mo, W, V в сопряженную углеродистую сталь 65;
- предложен удельный показатель массопереноса – скорость накопления прироста концентрации химических элементов во времени и показано, что скорость массопереноса за счет магнитной обработки может быть уменьшена: для углерода до 3-х раз, для легирующих элементов Cr, Mo, W, V в 7...20 раз.

7 Проведена практическая апробация результатов проведенного исследования в условиях производственного предприятия для подающих роликов механизма подачи пружинонавивочных автоматов NPВ-90 при их трехсменной работе и производительности 60 пружин / мин. Выявленная кратность повышения долговечности подающих роликов по критерию износостойкости составила 1,5 раза.

В приложении приведена производственная апробация работы, акты внедрения результатов диссертации.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

а) публикации в рецензируемых научных изданиях

1 Зелинский, В.В. Атомно-электронный аспект изнашивания в трибосистемах «инструментальная сталь – углеродистая сталь» [Текст] / В.В. Зелинский, Е.А. Борисова, Д.Н. Сучилин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. «Машиностроение, материаловедение». – 2017.– №2. – Том 19. – С. 133-150.

2 Зелинский, В.В. Атомно-электронный подход к повышению износостойкости трибосистем с ферромагнитными материалами [Текст] / В.В. Зелинский, Е.А. Борисова // Современные проблемы науки и образования (электронный журнал). – №1. – 2015. www.science-education.ru/125-19922.

3 Зелинский, В.В. Влияние магнитной обработки на долговечность исполнительных органов пружинонавивочных автоматов [Текст] / В.В. Зелинский, А.Н. Гоц, В.Г. Гусев, Е.А. Борисова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. «Машиностроение, материаловедение». – 2019.– №1.– Том 21. – С. 91-99.

4 Зелинский, В.В. Влияние обработки магнитным полем на износ инструментальных сталей / В.В. Зелинский, Ю.С. Степанов, Е.А. Борисова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2017. – №2 (322). – С. 73-81.

5 Зелинский, В.В. Моделирование диффузионно-адгезионных процессов в парах трения сталь – сталь исполнительных органов машин [Текст] / В.В. Зелинский, Е.А. Борисова, А.В. Карпов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. «Машиностроение, материаловедение». – 2018.– №1. – Том 20. – С. 83-93.

6 Зелинский, В.В. Повышение износостойкости исполнительных органов машин, образующих трибосистему «сталь-сталь» [Текст] / В.В. Зелинский, Ю.С. Степанов, Е.А. Борисова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2018. – №1 (327). – С. 43-52.

б) публикации в сборниках трудов, индексируемых SCOPUS

7 Borisova E.A. On the mechanism of ferromagnetic materials wear reduction / E.A. Borisova, V.V. Zelinskyi // Procedia Engineering. International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2015). – Vol. 129. – DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.017. – Pp. 111-115.

8 Gots A.N. Effect of Magnetic Processing on Mass Transfer in a Frictional Pair “Alloyed Steel–Carbon Steel” / A.N. Gots, V.V. Zelinskiy, E.A. Borisova // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019), 2020, Vol. II, pp/ 337-345.

9 Zelinskyi V.V. About the Quantum-mechanical Nature of Wear on Magnetized Cutting and Deforming Tools / V.V. Zelinskyi, E.A. Borisova // 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). Date 1-4 Dec. 2015. – DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414978. – Pp. 1-4.

10 Zelinskiy V.V. Reducing wear during coalescence in steel-steel tribo-systems by magnetic action / V.V. Zelinskyi, E.A. Borisova // Procedia Engineering. International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017. – Vol. 206. – <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.534>. – Pp. 662–667.

в) в научных журналах РИНЦ и материалах международных научно-технических конференций

11 Зелинский, В.В. Трибологический подход в оценке и повышении стойкости инструментальных материалов [Текст] / В.В. Зелинский, Е.А. Борисова // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 2. – С. 44-47.

12 Зелинский, В.В. Установление преобладающих видов и причин изнашивания режущих инструментов [Текст] / В.В. Зелинский, Е.А. Борисова // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности, № 2(12). – 2012. – С. 55-60.

13 Зелинский, В.В. Исследование износостойкости инструментальных сталей [Текст] / В.В. Зелинский, Е.А. Борисова // Под общей редакцией

Е.А. Памфилова. Сборник научных трудов по итогам международной научно-технической конференции. Брянск: БГИТА. – 2013. – Выпуск 18. – С. 37-41.

14 Зелинский, В.В. Опытная оценка влияния магнитной обработки на износостойкость инструментальных сталей [Текст] / В.В. Зелинский, Е.А. Борисова // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2013. – № 3. – С. 55-60.

15 Зелинский, В.В. О механизме снижения износа ферромагнитных материалов [Текст] / В.В. Зелинский, Е.А. Борисова // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2014. – Том 2. – №2. – С. 51-59.

16 Борисова, Е.А. Влияние магнитного поля на характеристики трения в трибосистеме «сталь-сталь» [Текст] / Е.А. Борисова, В.В. Зелинский // II Международная научно-практическая конференция «Современные тенденции развития науки и технологий», г. Белгород, 31 мая 2015. – С. 54-57.

17 Зелинский, В.В. Влияние магнитной обработки на трение стали по стали при схватывании [Текст] / В.В. Зелинский, Е.А. Борисова // Актуальные вопросы в научной работе и образовательной деятельности: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 30 мая 2015 г.: в 10 томах. Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком». – 2015. – Том 6. – С. 62-64.

Борисова Екатерина Александровна

**ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МЕХАНИЗМА ПОДАЧИ
ПРУЖИНОНАВИВОЧНЫХ АВТОМАТОВ МАГНИТНОЙ
ОБРАБОТКОЙ**

05.02.02 – Машиноведение, системы приводов
и детали машин

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати ____ . ____ 2021 г.
Объем 1,5 усл. п.л.

Заказ № _____
Тираж 80 экз.

Формат 60x90x16

127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9,
ЦСО Отдел дизайна, вёрстки и печати РУТ (МИИТ)