

ВОСТОЧНОУКРАИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи
УДК 621. 891:665.765

Осенин Юрий Иванович
кандидат технических наук
старший научный сотрудник

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ
ФРИКЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ
ТРИБОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ "КОЛЕСО-РЕЛЬС"**

Специальность 05.22.07 - Подвижной состав железных дорог
и тяга поездов

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Луганск - 1994



Работа выполнена в кафедре 00778617 (-)
ВОСТОЧНОУКРАИНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Научные консультанты - доктор технических наук, профессор
Коняев А. Н.
- доктор технических наук, профессор
Михин Н. М.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Коротенко М. Л.
- доктор технических наук, профессор
Павленко А. П.
- доктор технических наук, профессор
Бугай Ю. Н.

Ведущее предприятие - Производственное объединение
"Лугансктепловоз"

Защита состоится " 15 " ИЮНЯ 1994 года в 14⁰⁰
в аудитории № БИБЛИОТЕКЕ на заседании специализированного
Совета Д18.02.01 при Восточноукраинском Государственном универси-
тете по адресу: 348034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20а, ВГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан " 13 " МАЯ 1994 г.

Ответы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью,
просим направлять в адрес Совета университета.

Ученый секретарь
специализированного Совета
к. т. н., доцент

Жданов С. А.

Актуальность темы

В транспортной системе Украины железнодорожный транспорт удерживает лидирующие позиции по массовости пассажироперевозок и перемещению грузов. Существующая разветвленная сеть железных дорог позволяет рационально объединить в единый хозяйственный комплекс производителей и потребителей промышленной и сельскохозяйственной продукции. Гарантией сохранения за железнодорожным транспортом приоритетного государственного значения для Украины являются прямое железнодорожное сообщение между промышленно развитыми регионами и между периферией и центром, а также наличие соответствующей инфраструктуры, в том числе крупных локомотивостроительных и ремонтных заводов.

Тенденция роста весовых норм поездов и планируемое развитие высокоскоростного пассажирского движения выдвигают высокие требования к техническому совершенству и эксплуатационным показателям основной единицы подвижного состава - локомотива, технико-экономическая эффективность которого обусловлена, прежде всего, фрикционными свойствами триботехнической системы (ТС) "колесо-рельс".

Рост энергонагруженности ТС неминуемо приводит к потерям механической энергии в системе, расходуемой на необратимые изменения в тонких поверхностных слоях и генерирование тепла.

На практике это оборачивается существенными эксплуатационными издержками, проявляющимися в виде частых боковых выходов колес, значительного выхода из строя рельсов по контактно-усталостным дефектам, больших потерь остродефицитного материала бандажа, вследствие естественного и технологического износов, недоиспользования мощности силовой установки, перерасхода топлива, песка и смазочного материала и т. д.

Характерная для железных дорог интенсификация эксплуатации локомотивов и подвижного состава сопровождается устойчивой тенденцией непропорционального роста эксплуатационных издержек системы "колесо-рельс", которые уже в ближайшей экономической перспективе предопределяют резкое снижение рентабельности железных дорог.

В связи с изложенным, актуальность проблем, обусловленных фрикционным взаимодействием колеса с рельсом, представляется очевидной.

Цели и задачи исследования

Целью настоящей работы является поиск наиболее эффективных путей воздействия на триботехническую систему "колесо-рельс", направленных на обеспечение потенциально высоких фрикционных свойств взаимодействующих поверхностей и создание условий их реализации

опосредственно в режиме тяги локомотива.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1. Комплексные теоретические и экспериментальные исследования закономерностей физико-химической механики контактного силового взаимодействия колеса с рельсом, включающие:

- влияние входных силовых факторов на формирование индивидуальных свойств элементов системы;

- механизм формирования напряженно-деформированного состояния области контакта под влиянием нормальной и тангенциальной сил;

- взаимосвязь между индивидуальными и фрикционными свойствами ТС, обусловленная влиянием входных силовых факторов;

- изменение основных параметров контактирования (сближения, номинальной, контурной и фактической площадей касания и соответствующих давлений, интерференции деформаций микронеровностей т. д.) в зависимости от режимов реализации силы тяги и состояния поверхностей.

2. Исследование взаимосвязи между закономерностями протекания процессов трения и изнашивания в контакте колеса с рельсом и трибологическими характеристиками конструкции локомотива, физико-химического состояния контактирующих поверхностей, технологии изготовления и обработки колес.

3. Разработка методов оценки параметров микрорельефа поверхностей колеса и рельса с учетом напряженного состояния области взаимного контакта.

4. Исследование закономерностей силового взаимодействия элементов ТС "колесо-рельс" при условии размещения в области их контакта абразивных частиц.

5. Разработка математической модели триботехнической системы "колесо-рельс", обеспечивающей прогнозирование функциональных характеристик ТС и их количественная интерпретация применительно к конкретным условиям взаимодействия.

6. Прогнозирование выходных характеристик ТС "колесо-рельс" в зависимости от влияния конструктивных, технологических, материаловедческих и эксплуатационных факторов. Разработка практических рекомендаций.

7. Экспериментальные исследования на натурной стендовой установке характеристик силового взаимодействия колеса с рельсом в зависимости от влияющих факторов.

8. Оценка разработанных рекомендаций, направленных на улучшение фрикционных свойств ТС "колесо-рельс", по их влиянию на износ взаимодействующих поверхностей.

9. Исследование морфологии микронеровностей поверхности, особенностей формирования и влияния на эксплуатационные показатели локомотива.

10. Изыскание возможностей оперативного управления фрикционными свойствами колес и рельсов в условиях быстроизменяющегося физико-химического состояния окрестности взаимного контакта, создание технических средств для его (управления) осуществления, испытания и внедрение в практику использования на железнодорожном транспорте.

Методика исследования

Теоретические исследования базировались на молекулярно-механической (адгезионно-деформационной) теории внешнего трения и усталостной теории изнашивания.

Экспериментальные исследования включали лабораторные, стендовые и опытно-промышленные испытания. Использовались известные физические методы исследования процессов на микроуровне. Оценка выходных параметров ТС выполнена с применением методов планирования эксперимента. Параметры микрогеометрии поверхностей колеса и рельса находящихся в состоянии сложнапряженного нагружения, исследовались на основе разработанной и представленной в работе методике.

Оценка исследуемых параметров осуществлена на высокопрецизионной аппаратуре: профилометрах-профилографах "SURTRONIC STAND 112/1517, TALYSURF-5M", микроанализаторе "KAMEBAKS" и др. Обработка полученных результатов выполнена методами математической статистики с применением ПЭВМ - IBM.

Научная новизна работы

- на основе молекулярно-механических представлений о внешнем трении твердых тел определены наиболее эффективные пути воздействия на ТС систему "колесо-рельс", направленные на создание потенциально высоких фрикционных свойств взаимодействующих поверхностей и обеспечение соответствующих условий для их полной реализации в режиме тяги локомотива;

- установлено, что индивидуальные свойства элементов ТС претерпевают существенные изменения в результате однократного акта силового взаимодействия и носят, преимущественно, обратимый характер;

- показано, что главным звеном механизма взаимодействия колеса с рельсом, предопределяющим, при прочих равных условиях, интенсивность протекания процессов трения и изнашивания на пятнах микроконтактов, является изменение индивидуальных свойств вновь вступающих во взаимодействие поверхностей колеса и рельса;

- установлено, что микроконтактные процессы, протекающие в шероховатых слоях поверхностей колеса и рельса при их силовом взаимодействии, характеризуются интерференцией деформаций микронеровностей и оказывают существенное влияние на функциональные характеристики ТС;

- показано, что эффект изменения индивидуальных микрогеометрических свойств взаимодействующих поверхностей под воздействием нормальной и тангенциальной сил зависит от исходных размеров микронеровностей: уменьшение отношения высоты микронеровности к её основанию способствует усилению этого эффекта;

- установлено, что многообразие проявления фрикционных свойств ТС обусловлено изменением индивидуальных свойств элементов системы под влиянием силовых входных факторов;

- предложены эмпирические коэффициенты, учитывающие изменение индивидуальных свойств элементов ТС, использование которых целесообразно при определении предельных характеристик трения и изнашивания системы "колесо-рельс";

- показано, что в связи с интерференцией деформаций материалов колеса и рельса при внедрении в них абразивных частиц, достижение максимума в силовом взаимодействии возможно при условии размещения абразивных частиц в контакте с такой насыщенностью, при которой расстояние между ними равно не менее трем их радиусам;

- предложены математические модели ТС "колесо-рельс", характеризующие её "выход" в зависимости от фрикционных свойств ТС и индивидуальных свойств её элементов, выраженных в функциях "входа" системы;

- предложен метод оценки динамического изменения параметров микрогеометрии поверхностей колеса и рельса, происходящего под влиянием напряженно-деформированного состояния контакта;

- созданы технические средства, системы их диагностики и рабочие алгоритмы, обеспечивающие оперативное автоматизированное управление фрикционными свойствами ТС "колесо-рельс" в зависимости от скорости движения локомотива, номинальной площади контакта и физико-химического состояния контактирующих поверхностей.

Практическая ценность

Исследования, выполненные в диссертации являются частью "Государственной научно-технической программы развития железнодорожного транспорта Украины на 1992-1998 г.г." и межвузовских научно-исследовательских программ "Создание тепловозов нового поколения" и "Создание тепловозов для поставок на экспорт". Прикладное значение полученных в диссертации результатов и выводов реализовано в 12

отраслевых хозяйственных научно-исследовательских договорах (1989-1994 г.г.).

Выполненные исследования позволяют на стадии создания локомотива обеспечить потенциально высокие фрикционные свойства ТС "колесо-рельс" и обеспечить условия для полной реализации этих свойств в режиме тяги локомотива.

Установленные закономерности изменения фрикционных свойств ТС и индивидуальных свойств ее элементов под влиянием действующих силовых факторов создают предпосылки для существенного повышения адекватности математических моделей взаимодействия твердых тел реальному объекту, равно как и достоверности оценки характеристик трения и изнашивания системы "колесо-рельс".

Созданное устройство для улучшения сцепления колеса с рельсами позволяет осуществлять автоматизированное управление характеристиками сцепления колес с рельсами достигая, при минимизации потерь механической энергии, стабильной реализации коэффициентов сцепления на любой скорости движения локомотива и для любого исходного физико-химического состояния взаимодействующих поверхностей.

Апробация

Основные результаты выполненной работы доложены и одобрены на Всесоюзных и Международной научно-технических конференциях:

"Создание и техническое обслуживание локомотивов большой мощности" (г. Ворошиловград, 1985 г.), "Проблемы механики железнодорожного транспорта" (г. Днепропетровск, 1988 г.), "Обеспечение надежности узлов трения машин" (г. Ворошиловград, 1988 г.), "Методы и средства диагностирования технических средств железнодорожного транспорта" (г. Омск, 1989 г.), "Проблемы повышения качества, надежности и долговечности машин" (г. Брянск, 1990 г.), "Проблемы развития локомотивостроения" (г. Луганск, 1990 г.), "Износостойкость машин" (г. Брянск, 1991 г.), "Управление качеством, уплотнение и метрологическое обеспечение процессов механообработки" (г. Пенза, 1991 г.), IV Международной научно-технической конференции "Проблемы развития локомотивостроения" (Крым, *1933 г.), научном семинаре "Физико-химическая механика процессов трения и изнашивания" (МИНГ им. И.М.Губкина, г. Москва, 1987 г.), специализированном научном семинаре "Трение и износ в машинах" (МИНГ им. И.М.Губкина, г. Москва, 1988 г.), а также научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Восточноукраинского государственного университета (1982 - 1994 г.г.) и научно-технических отраслевых совещаниях.

Реализация и внедрение результатов исследования

На основе результатов исследований сформулированы требования к пескоподающим системам локомотивов, утвержденные Главным управлением локомотивного хозяйства МПС России.

Разработаны и внедрены на ПО "Лугансктепловоз" и ПО "Людиновотепловоз" методики оценки характеристик трения и изнашивания элементов системы "колесо-рельс" перспективных тепловозов, дизель-поездов и трамваев.

Полученные в работе результаты научных исследований положены в основу созданного устройства для улучшения сцепления колес с рельсами, защищенного патентом Франции № 9110557 и одиннадцатью авторскими свидетельствами. В настоящее время получены приоритетные справки из США, Японии, Германии и Англии и ведутся работы по патентованию изобретения в этих странах, а также в России.

Устройством оборудованы: экспортный вариант тепловоза ТГМ6в N0025, совместного производства ПО "Людиновотепловоз" и фирмы "Краусс Маффай" (ФРГ), опытные партии тепловозов ТГМ6а и 2ТЭ116, а также трамваи ЛТ10 производства ПО "Лугансктепловоз" (всего 25 единиц).

Технологическое обеспечение оптимального микрорельефа поверхности реализовано на тепловозе ТГМ6а № 2210. Эксплуатация тепловоза показала эффективность этого мероприятия и целесообразность его использования как финишной технологической операции при обработке поверхностей катания колес тепловозов.

По заказу МПС России на ПО "Лугансктепловоз" ведется оборудование 40 секций тепловозов 2ТЭ116 устройствами для повышения коэффициента сцепления колес с рельсами (договор с ПО "Лугансктепловоз" №53, 1992 г) и изготавливается 200 комплектов устройств для модернизации песочных систем тепловозов 2ТЭ116 и 2ТЭ10У приписного парка Юго-Восточной, Приволжской и Куйбышевской железных дорог.

Выполняется договор №37 с ПО "Лугансктепловоз" на оборудование устройствами 56 трамваев ЛТ10 и договор № В-94-7 с ПО "Людиновотепловоз" на оборудование устройствами опытной партии тепловозов ТЭМ7А и поставку партии устройств для замера производительности песочных форсунок.

Разработан и внедрен испытательный и наладочный измерительный комплекс для серийного производства на ПО "Лугансктепловоз" устройств для улучшения сцепления колес с рельсами.

По запросу фирмы "Краусс Маффай" (ФРГ) переданы материалы на изобретение для рассмотрения вопроса о приобретении лицензии.

Изобретение демонстрировалось на международной выставке "Железнодорожный транспорт - 89" (г. Москва), международной выстав-

ке-ярмарке "Научно-технические достижения Украины" (г. Загреб, 1990 г.) и ВДНХ Украины (г. Киев, 1990г.).

Публикации

По материалам диссертации опубликована 51 печатная работа общим объемом 32,4 п. л. в том числе одна монография, патент Франции и 13 авторских свидетельств.

1. Состояние проблемы исследований.

Развитие железнодорожного транспорта по пути увеличения весовых норм и скорости движения поездов, сопровождается повышением энергонагруженности системы "колесо-рельс", в результате подводимая к контакту механическая энергия частично или, в экстремальных условиях взаимодействия, полностью превращается в энергию неупорядоченного процесса, под влиянием которой интенсифицируется протекание необратимых изменений в тонких поверхностных слоях и генерирование тепла.

Уровень этой энергии во многих случаях, оказывается не адекватен возможностям системы в ее реализации, что является причиной срыва сцепления между колесом и рельсом и нарушения сплошности участвующих в процессе трения поверхностных слоев, выражающемся в деструкции материала и отделении частиц износа.

Снижение энергии неупорядоченного процесса возможно при условии улучшения фрикционного состояния контактирующих поверхностей, трибологическим критерием которого является коэффициент сцепления.

Улучшение фрикционных свойств ТС достигается как на стадии создания локомотива, путем регламентирования влияния конструктивных, технологических и материаловедческих факторов, так и на стадии его эксплуатации, посредством размещения в контакте различных реагентов, обеспечивающих направленное воздействие на физико-химическое состояние контактирующих поверхностей.

Ставшее очевидным несовершенство колеса с рельсом как фрикционной системы, а также доминирующее влияние климатических и погодных факторов, предопределили в качестве одного из главных приоритетов - улучшение фрикционных свойств ТС непосредственно на стадии эксплуатации локомотива. Наиболее эффективным и экономичным, в этих целях, стало использование кварцевого песка.

Ежегодно для улучшения взаимодействия колес с рельсами на сети железных дорог расходуется более трех с половиной миллионов кубических метров специально подготовленного песка. В среднем на один километр рельсового полотна приходится более 20 тонн отработанного песка. А на магистральных участках пути, где в режиме ре-

куперации реализуются большие тормозные силы на один километр падает 300-400 тонн песка в год.

В реальных условиях эксплуатации всепогодность железнодорожного транспорта достигнута исключительно за счет применения песка. В осенне-зимне-весенний период, наиболее неблагоприятный в отношении сцепления колес с рельсами, время пользования песком составляет 40-50% от всего времени движения локомотива в режиме тяги.

В целом, проблема фрикционного взаимодействия колеса с рельсом носит комплексный характер, главными звеньями которой является создание потенциально-высоких фрикционных свойств ТС и обеспечение условий для их полной реализации в режиме тяги локомотива.

Значительное продвижение вперед в решении данной проблемы стало возможным благодаря исследованиям ученых непосредственно связанных с тематикой железнодорожного транспорта. Прежде всего это С. М. Андриевский, А. В. Андреев, Ф. Т. Барвел, М. Р. Барский, А. И. Беляев, Н. А. Буше, А. Л. Голубенко, Н. И. Глаголев, Ю. В. Демин, Ц. Ф. Джонсон, А. Н. Долганов, И. П. Исаев, И. И. Калкер, А. Н. Коняев, М. Л. Коротенко, С. И. Косиков, Г. Краузе, К. Крафт, С. М. Куценко, Т. В. Ларин, В. Н. Лисунов, Ю. М. Лужнов, Н. Н. Меншутин, Д. К. Минов, А. П. Павленко, А. В. Попов, С. Ф. Редько, Г. В. Самме, Э. Д. Тартаковский, Т. А. Тибилов, В. Ф. Ушкалов, Ф. Фредерих, Я. Чап, С. Эмилсон и другие.

Кроме этого, трудно переоценить вклад ученых, чьи исследования не затрагивают проблематику взаимодействия колеса с рельсом, но оказывают существенное влияние на ход ее разрешения. Это трибологи: А. С. Ахматов, Г. М. Бартнев, В. А. Белый, Ю. Н. Бугай, Н. Б. Демкин, Б. В. Дерягин, Ю. А. Евдокимов, И. В. Крагельский, М. В. Коровчинский, А. П. Макушкин, Н. М. Михин, Э. В. Рыжов, Д. М. Толстой, А. В. Чичинадзе, Ф. Боуден, А. П. Куртель, Д. Мур, К. Рубинштейн, Р. Т. Спурр, Д. Тейбор и другие.

Учитывая многофакторность и взаимообусловленность процессов, протекающих в зоне фрикционного контакта, наиболее предпочтительным решением данной проблемы является создание математической модели триботехнической системы "колесо-рельс", адекватно отражающей закономерности процессов, протекающих в области контакта и обеспечивающей прогнозирование фрикционных свойств в зависимости от влияющих факторов. Это позволит уже на стадии проектирования локомотива обеспечить максимальную эффективность научно-технических и конструкторско-технологических мероприятий в отношении улучшения фрикционных свойств ТС. Однако создание такой модели возможно при условии исчерпывающего знания закономерностей процессов, протекающих в зоне контакта твердых тел при фрикционном взаимодействии.

Наиболее перспективной, с точки зрения описания процессов на

микроуровне и создания методов расчета и прогнозирования характеристик взаимодействия твердых тел, при их относительном перемещении, является молекулярно-механическая теория трения, основные положения которой получили достаточное экспериментальное подтверждение, и в настоящее время, не являются дискуссионными. Одной из основ этой теории является представления о дискретности контакта твердых тел, согласно которым процессы трения реализуются на пятнах фактического касания, а их интенсивность зависит от условий совокупного влияния конструктивных, технологических, материаловедческих и эксплуатационных факторов.

Достигнутый уровень развития этой теории позволяет получить удовлетворительную сходимость теоретических и экспериментальных результатов преимущественно для состояния трения покоя.

Применение аппарата этой теории к анализу силового взаимодействия в системе "колесо-рельс" в режиме движения предполагает учет параметров ТС характеризующих условия контактирования, обусловленные постоянной сменой взаимодействующих поверхностей. Так как выходные результирующие характеристики ТС являются функцией свойств взаимодействующих элементов и условий действия входа, следовательно один из возможных методов моделирования динамического состояния системы является учет функциональной взаимосвязи между входом ТС, индивидуальными свойствами взаимодействующих элементов и фрикционными свойствами системы в целом.

Установление закономерностей этой взаимосвязи позволит воспроизвести в полной мере механику контактного взаимодействия элементов системы и создать базовую модель ТС, отражающую основные звенья процессов в зоне фрикционного контакта. Дальнейшее повышение достоверности модели возможно при условии ее дополнения подмоделями, характеризующими трибофизические и трибохимические явления, протекающие на пятнах фактического касания микронеровностей.

2. Формирование индивидуальных свойств поверхностей колеса и рельса и их влияние на фрикционные свойства триботехнической системы.

Фрикционные свойства триботехнической системы (ТС) "колесо-рельс" формируются на основе свойств составляющих её элементов и проявляются в результате действия входных силовых факторов. В свою очередь между входными силовыми факторами и свойствами элементов ТС существует функциональная связь. Наиболее изученные особенности этой связи касаются изменений свойств элементов ТС вследствие необратимых деформаций и механически активируемых физико-химических явлений в поверхностных слоях. В результате, поверхностные слои в

процессе эксплуатации ТС, приобретают свойства существенно отличающиеся от исходного состояния. Учет эволюции этих свойств является одной из основ теории трения металлов.

В тоже время, обратимые изменения свойств элементов ТС, имеющие место в процессе каждого единичного акта силового взаимодействия и, очевидно, оказывающие влияние как на фрикционные свойства, так и на параметры конечного состояния системы, остаются по-существу неисследованными.

Известно, что силовое взаимодействие твердых тел при их относительном перемещении, локализовано в тонких поверхностных слоях с эпицентрами, расположенными на пятнах фактического касания микронеровностей. В связи с этим особый интерес представляют микрогеометрические свойства элементов трибосопряжения предопределяющие дискретность контакта твердых тел и способность шероховатого слоя противостоять местным пластическим деформациям при внедрении в него более твердого тела.

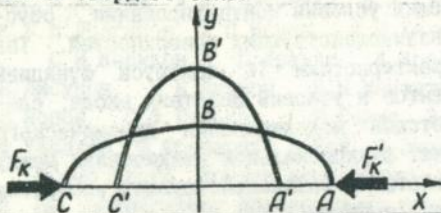


Рис.1. ДЕФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ЕДИНИЧНОЙ МИКРОНЕРОВНОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ СИЛ.

Основные закономерности изменения геометрических размеров единичной элементарной микронеровности установлены на основе решения задачи о деформировании эллиптической поверхности под воздействием тангенциальных сил (рис.1).

Зависимость между полуосями эллипса и длиной дуги получена в виде:

$$l = a \epsilon \left(\frac{\pi}{2}; k \right) \quad (2.1)$$

и преобразована с помощью биномиального ряда

$$(1+x)^m = 1 + m x + \frac{m(m-1)}{1 \cdot 2} x^2 + \frac{m(m-1)(m-2)}{1 \cdot 2 \cdot 3} x^3 + \dots$$

$$\dots + \frac{m(m-1)\dots[m-(n-1)]}{1 \cdot 2 \dots n} x^n + \dots \quad (2.2)$$

(для $m = 1/2$ и $x = -k^2 \sin^2 x$) в следующую

$$l = \frac{a\pi}{2} \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} \cdot \frac{k^{2n}}{2n-1} \right] \quad (2.3)$$

Уравнение (2.3) устанавливает (при $l = \text{const}$) связь

между основными элементами эллипса, характеризующими деформацию микронеровности. Решение уравнения численным методом позволило установить, что эффект изменения геометрических размеров микронеровности зависит от исходного отношения высоты микронеровности к её основанию. В связи с этим, проявление эффекта более существенно при повышении класса шероховатости и волнистости поверхности.

Исследование причинно-следственной связи между действующими силами, деформациями и свойствами элементов ТС проведено в условиях реального масштаба геометрии колеса и рельса.

Эксперимент выполнен на натурном стенде, состоящем из локомотивного колеса диаметром 1,05 м, закрепленном в раме, отрезка рельса, опорного катка и систем радиального и тангенциального нагружения стенда.

Суть эксперимента заключалась в снятии (методом слепков) параметров микрогеометрии с предварительно нагруженных нормальной и тангенциальной силами участков поверхности колеса и рельса, предшествующих их основному контакту. Учитывая, что в этом случае создается сложнапряженное состояние поверхности, эксперимент продублирован на специальном устройстве создающем, для испытуемых образцов, деформации изгиба, наиболее адекватно отражающие процессы в реальном объеме материала при которых на развитие деформации шероховатого слоя оказывает влияние связь с подложкой. Способность шероховатого слоя противостоять местным пластическим деформациям оценивалась по микротвердости поверхности.

Полученные оттиски топографии поверхности исследовались на профилометре-профилографе "SURTRONIC STAND 112/1517", а также, в режиме растровой электронной микроскопии, на микроанализаторе "КАМЕБАКС". Контроль микрогеометрии, применительно к экспериментам на устройстве, осуществлялся прямым профилометрированием. Микротвердости - на микротвердомере ПМТ-3.

Результаты экспериментов, представлены на рис. 2.

Исследование функциональной взаимосвязи между действием "входа" триботехнической системы и свойствами её элементов, позволило установить, что при нагружении системы "колесо-рельс" нормальной и тангенциальной силами, во взаимный контакт взаимодействующих элементов вступают их поверхности, индивидуальные свойства которых существенно отличаются от исходных, как правило, используемых в качестве базовых при математическом моделировании и проведении инженерных расчетов. Закономерности изменения свойств элементов ТС дифференцируются в зависимости от знака напряженного состояния поверхностного слоя.

На участках действия напряжений сжатия наблюдается рост вы-

сотных и уменьшение шаговых параметров шероховатости и волнистости. На участках действия напряжений растяжения наблюдается уменьшение высотных и рост шаговых параметров шероховатости и волнистости.

Интенсивность изменения индивидуальных свойств элементов ТС в зависимости от действия напряжений растяжения и сжатия различна, менее интенсивно протекают изменения при условии действия напряжений растяжения, что вероятно, объясняется некоторым компенсированием эффекта растяжения ростом поверхностных трещин.

Деформирование микронеровностей в предконтактной зоне поверхности в условиях силового нагружения колеса и рельса характеризуется минимальными значениями пластической составляющей.

Деформирование микрорельефа поверхности предопределяет соответствующее изменение радиусов закругления вершин микронеровностей, а также комплексных критериев шероховатости и волнистости. Характер их изменений обусловлен знаком реализуемых напряжений в поверхностном слое твердых тел. Напряжения сжатия приводят к уменьшению радиусов закругления вершин микронеровностей и увеличению комплексных критериев микрогеометрии. При напряжениях растяжения наблюдается противоположная тенденция с менее выраженной интенсивностью.

Изменение геометрических размеров микронеровностей соответственно оказывает влияние на способность шероховатого слоя противостоять его деформированию, критерием которой является микротвердость поверхности. Контроль микротвердости поверхности образца, нагруженного напряжениями различного знака показал ее увеличение с ростом высотных и уменьшением шаговых параметров микрогеометрии.

Изменение индивидуальных свойств взаимодействующих элементов ТС соответственно предопределяет изменение фрикционных свойств системы в целом (рис. 3).

Одновременное действие, по отношению к триботехнической системе, нормальной и тангенциальной сил ужесточает условия формирования площадей касания A_c и A_r и реализации соответствующих давлений p_c и p_r . Для данных условий взаимодействия наблюдается интенсификация изменения A_c и A_r , а также p_c и p_r , вследствие деформирования микрорельефа поверхности в предконтактной зоне. При этом в области действия напряжений сжатия наблюдается уменьшение A_c и A_r с соответствующим ростом p_c и p_r . В области действия напряжений растяжения тенденция противоположная с менее выраженной интенсивностью.

Оценка отношения номинальных и контурных давлений к твердости материала по Бринеллю в элементах ТС показала, что напряженно-деформированное состояние, являющееся одной из наиболее важных

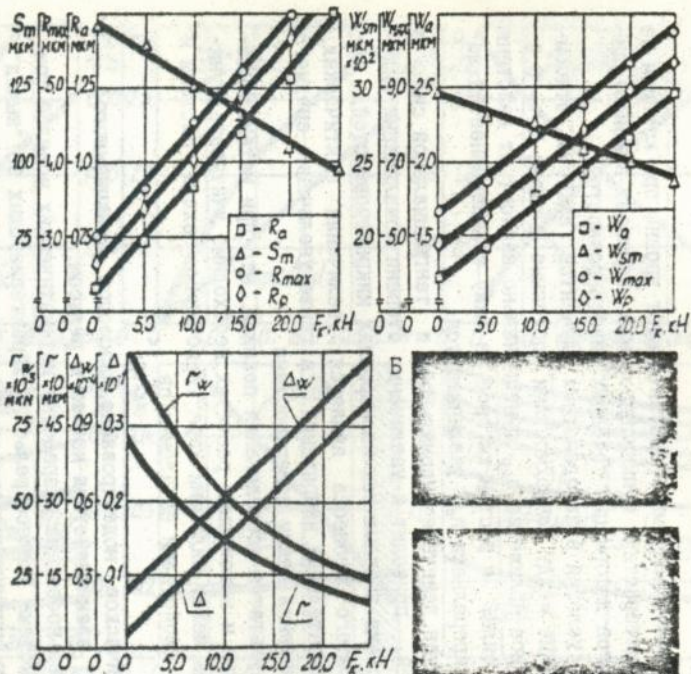
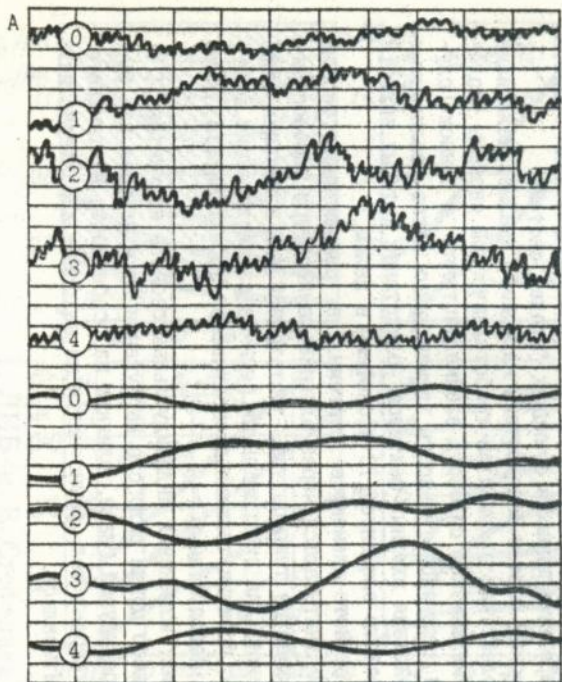


Рис. 2. ИЗМЕНЕНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ МИКРОГЕОМЕТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ КОЛЕСА, ВКАТЫВАЮЩЕЙСЯ В КОНТАКТ, В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ СИЛЫ

Б. Микротопография поверхности до и в момент нагружения (микроанализатор "КАМЕВАКС")
 А. Динамика изменения шероховатости и волнистости поверхности. 0 - до нагружения; 1 - $F_k = 5,0$ кН; 2 - $F_k = 15,0$ кН; 3 - $F_k = 25,0$ кН;

R - шероховатость; W - волнистость; W_{sm} , S_m - шаг микронеровностей; R_{max} , W_{max} - максимальные высоты; R_p , W_p - высоты нивелирования; γ , γ_w - радиусы закругления вершин; Δ , Δ_w - комплексные критерии; F_k - тангенциальная сила.

фрикционных свойств системы, соответствует уровню при котором на её выходные характеристики функционирования оказывает влияние интерференция очагов деформаций соседних микронеровностей.

Для данных условий взаимодействия элементов системы относительные сближение между поверхностями постоянно и равно $h_{\text{ср}} = 0,4$. Среднее абсолютное сближение $h_{\text{ср}}$ функционально зависит от действия тангенциальной силы, с ростом которой, в силу закономерностей деформирования микрорельефа $h_{\text{ср}}$ увеличивается.

Одновременное действие нормальной и тангенциальной сил, с ростом последней, приводит к увеличению степени локализации силового взаимодействия твердых тел на вершинах микронеровностей. Характеристиками этого процесса является увеличение фактических, контурных и касательных напряжений, а также увеличение среднего абсолютного сближения между поверхностями.

Анализ результатов исследования показал, что при математическом моделировании и инженерных расчетах необходимо учитывать функциональную связь между силовыми характеристиками "входа" системы и индивидуальными свойствами её элементов.

3. Математическое моделирование процессов фрикционного взаимодействия колеса с рельсом.

Третья глава посвящена разработке математических моделей триботехнической системы "колесо-рельс", характеризующих её "выход", в зависимости от фрикционных свойств ТС и индивидуальных свойств её элементов, представленных в функциях "входа" системы.

Математические модели разработаны на основе анализа механизма силового взаимодействия элементов триботехнической системы "колесо-рельс". Под механизмом силового взаимодействия, в данном случае, понимается последовательность элементарных актов реализуемых под влиянием действия входных факторов, следствием которых является изменение свойств элементов ТС и системы в целом.

Изменения свойств элементов системы, в современной теории трения металлов, учитываются через влияние температуры трибосопряжения. Однако развитие температуры, достаточной для изменения этих свойств, характерно для экстремальных режимов взаимодействия колеса с рельсом и с позиции технико-экономической эффективности узла трения является недопустимым.

В тоже время, изменения индивидуальных свойств элементов ТС в процессе единичного цикла силового нагружения, оказывающее как было показано в предыдущей главе, влияние на особенности контактного взаимодействия твердых тел, равно как и на выходные характеристики ТС, ранее не учитывались.

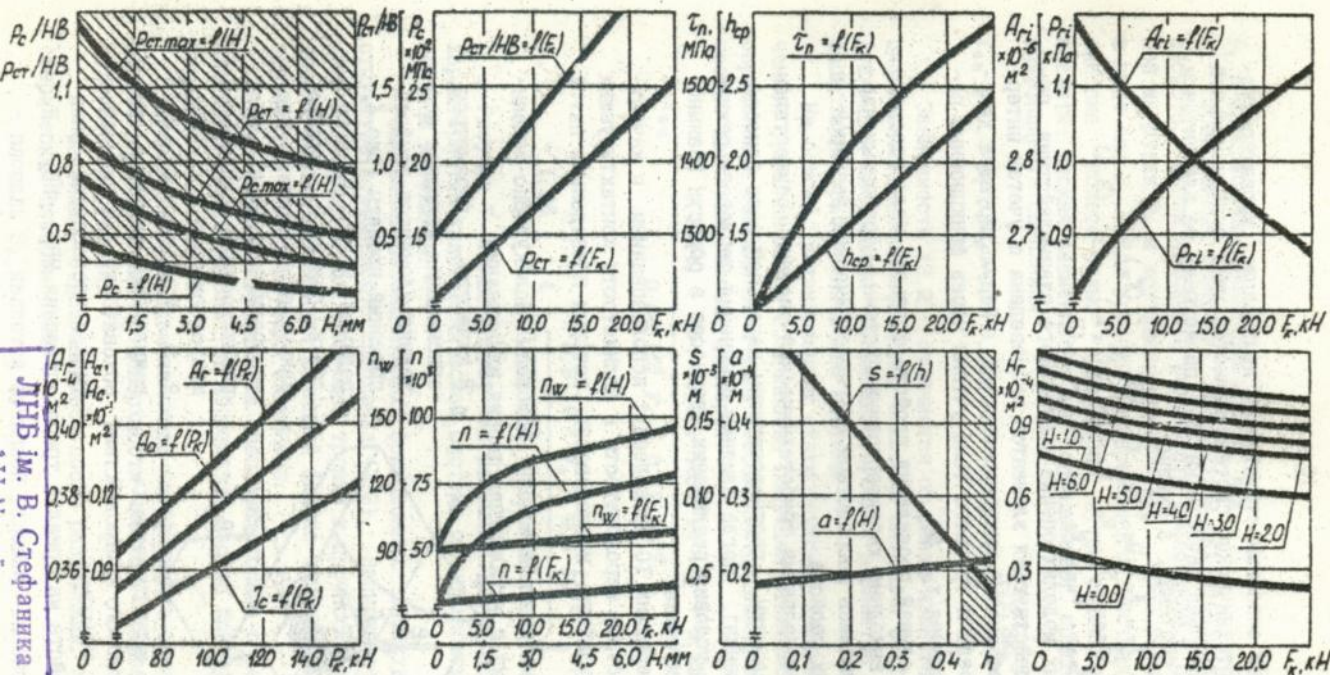


Рис. 3. ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТС "КОЛЕСО-РЕЛЬС" ОТ СИЛОВЫХ ВХОДНЫХ ФАКТОРОВ.

- "интерференция" деформаций микронеровностей;
 P_c - контурное давление; P_{ct} - контурное давление в режиме тяги; НВ - твердость материала по Бринеллю; A_r, A_a, A_c - фактическая, номинальная и контурная площади контакта; A_{r1} - площадь касания единичной микронеровности;

P_{r1} - нормальное напряжение; n, n_w - количество микронеровностей и волн волнистости; a, s - радиус микронеровностей и расстояние между ними; H - прокат колеса; τ - касательные напряжения; h_{cp}, h - среднее и абсолютное сближения.

В связи с этим основным структурным признаком, характеризующим модель триботехнической системы является учет функциональной связи между фрикционными свойствами ТС, свойствами ее элементов и параметрами входа системы, а именно:

$$\begin{aligned} (n_{ср}, A_r, A_c, p_c, p_r, \tau_A, HB) &= f_1(F_K); \\ (R_{max}, S_m, R_p, r, \Delta) &= f_2(F_K); \\ (W_{max}, W_{sm}, W_p, \Delta_w, r_w) &= f_3(F_K). \end{aligned} \quad (3.1)$$

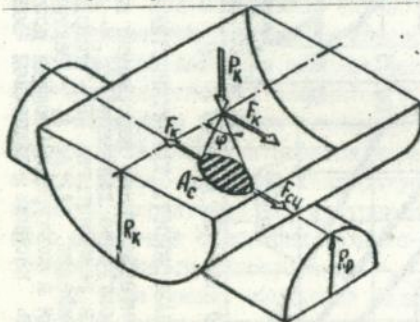
В предложенных моделях оценка контактного взаимодействия поверхностей взаимодействующих элементов произведена с учетом интерференции очагов деформаций микронеровностей. Результирующее действие окружающей среды и третьего тела учтены через фрикционные параметры трибосопряжения τ_0, β .

Как частный случай проявления свойств третьего тела рассмотрено влияние, на выходные характеристики системы, абразивных частиц, которые учитывались посредством их геометрических размеров и физико-механических свойств.

Анализ функционирования триботехнической системы осуществлен применительно к условиям, соответствующим начальной фазе бокового трения (трение скольжения), когда влияние изменения теплового режима трибосопряжения на условия реализации процессов в области взаимного контакта незначительно.

Оценка характеристик ТС проведена с использованием, в качестве исходных, параметров шероховатости и волнистости контактирующих поверхностей, результаты исследования которых приведены в пятой главе.

В основу математической модели положены молекулярно-механическая теория трения и усталостная теория изнашивания.



В качестве параметров, описывающих исходное состояние элементов трибосопряжений приняты (рис. 4) радиусы колеса R_K и головки рельса R_P , радиус закругления вершины микронеровностей R и волн волнистости R_w , параметры микрогеометрии $R_{max}, R_a, R_z, S_m, W_{max}, W_a, W_z, W_{sm}$, комплексные критерии шероховатости Δ и волнистости Δ_w , показатели физико-механических свойств материалов трибосопряжения $HB_1, HB_2, E_1,$

Рис.4. РАСЧЕТНАЯ СХЕМА К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОЛЕСА С РЕЛЬСОМ.

ко-механических свойств материалов трибосопряжения $HB_1, HB_2, E_1,$

E_2 и фрикционные характеристики τ_0 и β .

Фрикционные свойства ТС получены как производные от исходных свойств, проявляющиеся в результате приложения к системе нормальной нагрузки R_k и крутящего момента $M_{кр}$, представленного на схеме в виде сил F_k . Для условий одновременного действия по отношению к системе "колесо-рельс" нормальной и тангенциальной сил получена аналитическая зависимость для определения предельных значений коэффициента сцепления:

$$f_{сц.п} = 0.3 p_T^{-1} [\tau_0 - (\beta + 0.14) HB] + 1.4\beta + 1.4 \left[\frac{12.8k_R^2 R_z R_p}{(S_n S_R)^2} \right]^{1/2}, \quad (3.2)$$

Зависимость (3.2) отличается от ранее известных учетом функциональной взаимосвязи между силовыми входными факторами, индивидуальными свойствами взаимодействующих элементов и фрикционными свойствами триботехнической системы.

На основе установленных статистических закономерностей отмеченной функциональной взаимосвязи получена зависимость (3.3) для определения текущих значений коэффициентов сцепления во всем диапазоне действия силовых факторов.

$$f_{сц} = \frac{0.3 [\tau_0 - (\beta + 0.14) (0.2 \cdot 10^5 F_k + 0.25 \cdot 10^{10})]}{0.66 \cdot 10^5 F_k + 0.12 \cdot 10^{10}} + 1.4\beta + 1.4 \left[\frac{0.6 \cdot 10^{-10} F_k + 0.1 \cdot 10^{-5}}{0.45 \cdot 10^{-3} - 1.5 \cdot 10^{-8} F_k} \right]^{1/2}, \quad (3.3)$$

Рисунок 7 иллюстрирует погрешности при определении выходных характеристик триботехнической системы по предложенной и ранее известным методикам.

Реализация потенциальных фрикционных свойств ТС, согласно структуре коэффициента сцепления (3.3), зависит от пьезокоэффициента молекулярной составляющей трения и прочности на сдвиг молекулярной связи, являющихся функцией физико-химического состояния поверхности контактирующих элементов.

При оценке коэффициента сцепления колеса с рельсом при наличии на границе раздела тел абразивных частиц приняты следующие допущения:

- молекулярная составляющая коэффициента сцепления прямопропорциональна площади S_x поверхности частицы, образующейся в результате разрушения;
- частицы, образовавшиеся после разрушения, аппроксимируются сферической поверхностью;
- площадь S_x является функцией условий силового нагружения.

ределении частиц песка в контакте в один и более слоев (рис. 5). Для первого из них получена аналитическая зависимость $f_{сц}$ от влияющих факторов (3.4)

$$f_{сц} = f_{мол} + 1.4 \left(\frac{P_k}{2 \pi r^2 H B n} \right)^{1/2} \quad (3.4)$$

где n - количество абразивных частиц.

Реализация $f_{мех}$ обусловлена при прочих равных условиях, величиной внедрения во взаимодействующие поверхности, при которой начи-

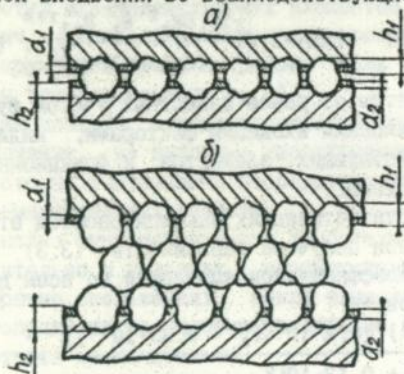


Рис.5. ВОЗМОЖНЫЕ ВАРИАНТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АБРАЗИВНЫХ ЧАСТИЦ В КОНТАКТЕ КОЛЕСА С РЕЛЬСОМ.

ная с момента $R/S = 0,33$, будет происходить интерференция деформаций материала колеса (равно как и рельса), оттесняемого внедряющейся абразивной частицей. Это состояние характеризуется прекращением дальнейшего внедрения и интенсивным ростом давлений на взаимодействующие частицы. В результате абразивные частицы разрушатся, что приведет к снижению их способности в передаче тангенциальных усилий. Для обеспе-

чения максимального внедрения частиц кварца в поверхности колеса и рельса необходимо создать такую их насыщенность, в пределах номинальной площади контакта, при которой расстояние между абразивными частицами соответственно равно (рис. 6):

$$S = 3r_{ср} \quad (3.5)$$

где S - расстояние между частицами.

С учетом (3.5) максимальное количество частиц в контакте определится из выражения

$$n = A_d / 0,25\pi S^2 \quad (3.6)$$

При соблюдении условия (3.6) достигается максимум $f_{сц}$.

Учитывая, что молекулярная составляющая $f_{мол}$ прямо пропорциональна площади S_x , образовавшейся в результате разрушения абразивных частиц, следовательно, для достижения $f_{мол\ max}$ необходимо создать наиболее благоприятные условия для интенсивного разрушения абразивных частиц. Показано, что эти условия создаются при размещении абразивных частиц в контакте в один слой.

Кроме оценок функционирования ТС "колесо-рельс" по критерию

коэффициента сцепления, важное значение имеет интенсивность изнашивания, характеризующая изменения в поверхностном слое, вследствие акта силового взаимодействия. В совокупности эти показатели оценивают технико-экономическую эффективность трибосопряжения.

Для условий взаимодействия колеса с рельсом при одновременном действии по отношению к ТС нормальной и тангенциальной сил получена зависимость интенсивности изнашивания J_h от влияющих факторов, учитывающая уменьшение объема материала, вовлекаемого в деформацию и связанное с этим снижение количества циклов, необходимых для отделения частицы износа.

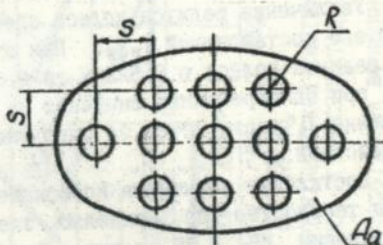


Рис.6. СХЕМА К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОПТИМАЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА АБРАЗИВНЫХ ЧАСТИЦ В КОНТАКТЕ

$$J_{hn} = \frac{0,64 R_z^{1/2} R_p^{1/2} k_R^{1/2} (\tau')^t P_T}{S_m^{1/2} b_v^t (5p_T - 1,1 HB)} \quad (3.7)$$

При рассмотрении изнашивания поверхностей колеса и рельса под воздействием абразивных частиц учитывалось следующее:

- в зоне фрикционного контакта существуют зоны сцепления $E_{c\alpha}$ и скольжения $E_{c\kappa}$;
- поверхности колеса и рельса волнисты;
- взаимодействие осуществляется в режиме тяги локомотива, что учитывается установленной ранее взаимосвязью свойств элементов трибосопряжения и силовыми факторами;
- абразивные частицы дробятся в микрозазоре колеса и рельса и непосредственно в области контакта.

Для этих условий получена зависимость для оценки предельного износа поверхностей колеса, реализуемого при максимальных значений силы тяги под воздействием абразивных частиц.

$$h_1^* = \frac{0,74 A_c}{\pi R^2} \left[0,25k \lg h^2 + \frac{1,07 \Gamma^2 HB_2^{3/2} (W_{sm1} + W_{sm2})}{(1,1 HB_1 + HB_2)^{3/2}} \right] \quad (3.8)$$

Предложенные зависимости (3.2-3.4, 3.7, 3.8) позволяют прогнозировать коэффициент сцепления и интенсивность изнашивания в зависимости от основных конструктивных, материаловедческих, технологических и эксплуатационных факторов, влияющих на процессы протекающие в триботехнической системе. Зависимости, иллюстрирующие это влияние представлены на рис. 7.

Анализ показывает, что улучшение фрикционных свойств ТС на стадии создания локомотива возможно, путем корректного конструирования трибосопряжения "колесо-рельс", при котором учитывается влияние конструктивных, технологических и материаловедческих факторов.

Повышение общего коэффициента сцепления возможно при условии снижения контурных давлений в ТС.

Увеличение радиуса колеса обеспечивает некоторый рост $f_{сц}$ за счет его составляющей $f_{мод}$. При этом $f_{мех}$ не изменяется. Увеличение радиуса колеса с 0,525 м до 0,625 м позволяет повысить $f_{сц}$ на 4%, при одновременном снижении на 8% контурных давлений. При этом снижение J_n достигается за счет уменьшения числа циклов силовых воздействий.

Достижение повышения коэффициента сцепления за счет варьирования твердостью по Бринеллю элементов трибосопряжения возможно при условии $HВ_1 - HВ_2 \rightarrow \max$. В этом случае создаются наиболее благоприятные условия для внедрения более твердых микронеровностей в менее твердое контртело. Реализация коэффициента сцепления достигается за счет $f_{мех}$. Износ поверхностей взаимодействующих элементов распределится обратнопропорционально их твердости.

Повышение $f_{сц}$ на стадии создания локомотива, как правило, нивелируется влиянием физико-химического состояния поверхностей, формирующегося в условиях эксплуатации под влиянием климатических и погодных факторов. Возможности воздействия на физико-химическое состояние поверхностей крайне ограничены и представляют собой энергоёмкий процесс, что является причиной отсутствия в настоящее время экономически целесообразных систем повышения $f_{сц}$ за счет его молекулярной составляющей.

Альтернативным путем повышения $f_{сц}$ является активизация роли во взаимодействии его механической составляющей.

Увеличение отношения величины внедрения микронеровности (h) к радиусу закругления (r) ее вершины обеспечивает интенсивное повышение коэффициента сцепления за счет $f_{мех}$. На практике это возможно путем подачи в зону контакта абразивных твердых частиц, которые внедряясь во взаимодействующие поверхности создают эквивалентную жесткую поверхность. Учитывая взаимосвязь между h и r , наибольший эффект в повышении $f_{сц}$ будет наблюдаться при уменьшении размеров абразивных частиц, до величин r_{min} обусловленных внедрением во взаимодействующие поверхности и толщиной присутствующих на них загрязнений.

Износ поверхностей для данных условий взаимодействия элементов будет определяться усталостными процессами вследствие перемещения материала абразивными частицами.

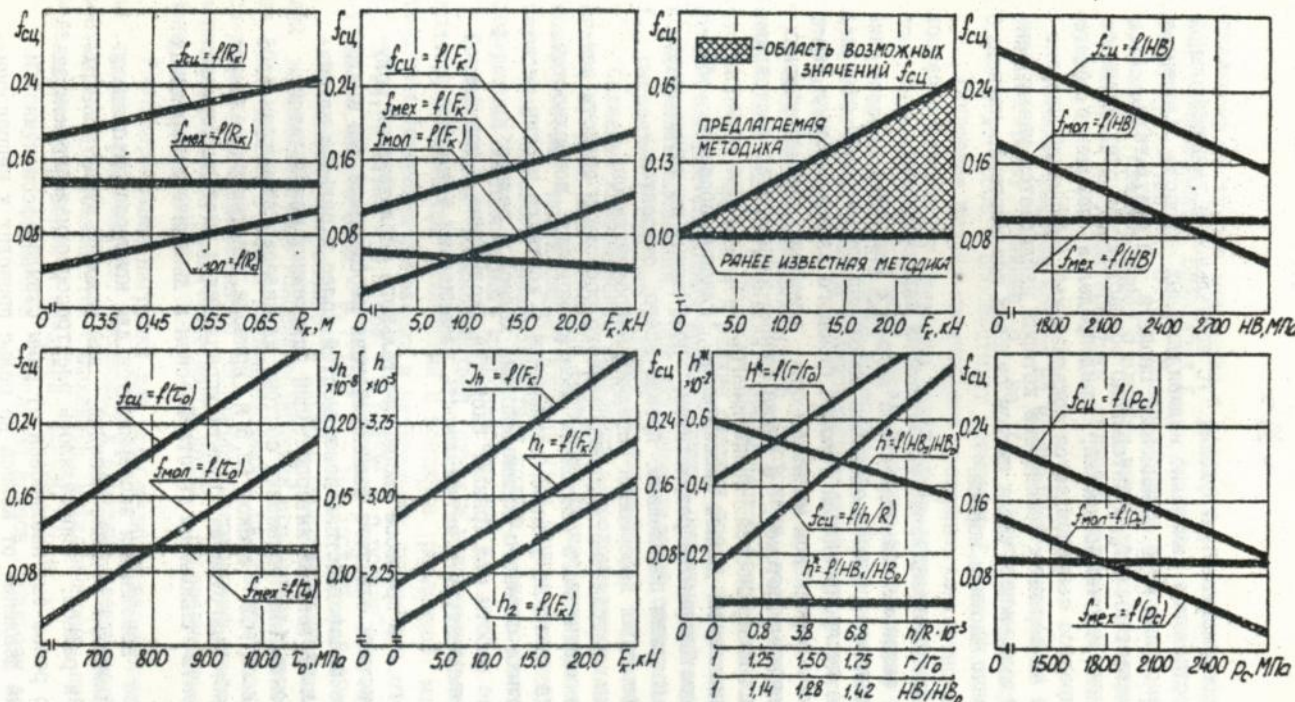


Рис. 7 ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ "КОЛЕСО-РЕЛЬС" ОТ ВЛИЯЮЩИХ КОНСТРУКТИВНЫХ, МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИХ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ.

R_k - радиус колеса; τ_0 - прочность молекулярной связи на сдвиг; F_k - тангенциальная сила; HB - твердость материала по Бринеллю; h - глубина внедрения;

R - радиус закругления вершины микронеровности; p_c - контурное давление; r - радиус абразивной частицы; J_h - интенсивность изнашивания.

При одновременном нагружении ТС нормальной и тангенциальной силами осуществляется изменение индивидуальных свойств элементов системы, равно как и её фрикционных свойств. В результате, $f_{\text{норм}}$ несколько снижается, а $f_{\text{танг}}$ интенсивно возрастает за счет увеличения внедрения микронеровностей, предопределяя повышение общего $f_{\text{св}}$. Этот процесс сопровождается локализацией деформаций микронеровностей на их вершинах вследствие которых наблюдается увеличение J_h за счет уменьшения числа циклов силовых воздействий, приводящих к отделению частицы износа.

4. Экспериментальные исследования характеристик силового взаимодействия колеса с рельсом

Экспериментальное исследование выполнено на натурной стендовой установке воспроизводящей условия силового взаимодействия колеса с рельсом в реальном масштабе сил, времени, геометрических размеров, тепловых потоков, а также физико-химического состояния контактирующих поверхностей. Экспериментальной проверке подвергнуты ключевые положения данной диссертации, главным образом, обуславливающие достоверность результатов, полученных на математических моделях. К таким положениям, прежде всего, относятся:

- интерференция деформаций соседних микроконтактов;
- влияние напряженно-деформированного состояния области контакта, физико-химического состояния контактирующих поверхностей, радиуса колеса, а также условий размещения в контакте частиц песка на характеристики силового взаимодействия колеса и рельса;
- влияние работы сил трения, скорости скольжения и нормальной нагрузки на температуру и интенсивность изнашивания элементов трибосоприятия.

Кроме того, в процессе экспериментального исследования получены характеристики силового взаимодействия необходимые для анализа контактного взаимодействия поверхностей колес и рельсов на микроуровне и количественной интерпретации полученных результатов.

Экспериментальная установка состоит из колеса, диаметром 1,05 м, отрезка рельса Р65, длиной 12,5 м, привода, систем радиального и тангенциального нагружения, пульта управления и системы торможения. Эксперименты выполнены в статическом и динамическом режимах работы стенда.

В процессе выполнения экспериментов для контроля распределения песка по площадке соприкосновения, для условий сухих поверхностей колеса и рельса, определялось электросопротивление контакта. Для этого рельс был изолирован от рамы стенда.

Увеличение давления от колеса на рельс приводит к непропорци-

ональному росту сил сцепления в контакте, предопределяющему снижение коэффициента сцепления $f_{c\mu}$, которое в диапазоне исследуемых нагрузок составило 6-7%. Падающая ветвь зависимости $f_{c\mu} = f(p_c)$, позволяет сделать вывод о влиянии интерференции деформаций микронеровностей на характеристики силового взаимодействия колеса с рельсом.

Влияние радиуса колеса на коэффициент сцепления оценено по эквивалентному влиянию p_c на $f_{c\mu}$. Увеличение радиуса колеса с 0,525 м до 0,625 м способствует повышению $f_{c\mu}$ на 3%.

Ухудшение физико-химического состояния контактирующих поверхностей способствует снижению коэффициента сцепления колеса с рельсом. Размещение в контакте песка частично компенсирует влияние физико-химического состояния поверхности. Рост контурных давлений для отмеченных условий взаимодействия приводит к снижению коэффициента сцепления.

Влияние физико-химического состояния взаимодействующих поверхностей колеса и рельса в динамическом режиме эквивалентно режиму статики. Так же как и в режиме статики песок полностью не нейтрализует влияние состояния контактирующих поверхностей на реализацию коэффициента сцепления. При ухудшении условий сцепления максимум $f_{c\mu}$ смещается в сторону больших скольжений.

Снижение коэффициента сцепления с ростом контурных давлений в контакте, для всего спектра возможных физико-химических состояний поверхностей, подтверждает влияние (для данных условий) на характеристики силового взаимодействия колеса с рельсом интерференции деформаций контактирующих микронеровностей.

Для условий взаимодействия сухих и замасленных поверхностей колес и рельсов при размещении в контакте различной массы песка получены уравнения регрессии в натуральных значениях:

$$f_{c\mu 1} = 0,523 + 0,1165M - 0,0445M^2 - 0,00043P \quad (4.1)$$

$$f_{c\mu 2} = 0,46 + 0,055M - 9,7 \cdot 10^{-4} P - 1,5 \cdot 10^{-6} M^2 + 2,69 \cdot 10^{-6} P^2$$

Максимальная способность песка в передаче тангенциальных усилий наблюдается при условии размещения его оптимального количества, для данных условий взаимодействия, на границе раздела "колесо-рельс". Для замасленного состояния поверхностей необходимо примерно трехкратное увеличение массы песка, по сравнению с сухими поверхностями.

Рост нормальной нагрузки для всех величин насыщенности песка на границе раздела тел, приводит к снижению электросопротивления контакта, что объясняется сближением металлических поверхностей вследствие разрушения и внедрения частиц песка.

Максимум коэффициента сцепления колеса с рельсом достигается

на сухих рельсах, при условии размещения в контакте такого количества песка, продукт разрушения которого создает монослой. Экспериментально это подтверждается нарушением электропроводности контакта, в момент реализации максимума по сцеплению. Данным условиям соответствует размещение в контакте массы песка $M = 0,13 \cdot 10^{-4}$ кг (при $P_k = 115$ кН).

Скорость скольжения колес относительно рельсов влияет на интегральную линейную интенсивность изнашивания, главным образом, через развиваемую при этом температуру. Относительная скорость скольжения колес и контурное давление оказывают примерно равное влияние на генерируемую температуру в контакте. Доминирующее влияние на интегральную линейную интенсивность изнашивания оказывает работа сил трения, с которым сопоставимо лишь влияние относительного скольжения колес.

При постоичестве скольжения колес относительно рельсов температура в контакте увеличивается пропорционально росту нормальной нагрузки. Исходное физико-химическое состояние поверхностей влияет на уровень температуры лишь в начальный период нагружения. Для условий взаимодействия колеса тепловоза 2ТЭ116 с рельсом, температура поверхности при срыве в боксование составляет свыше 700°C .

5. Микрорельеф поверхности катания колеса, морфология микронеровностей и их влияние на эксплуатационные показатели локомотива

Анализ закономерностей механики контактного взаимодействия твердых тел на микроуровне (вторая глава), а также получение количественных результатов при математическом моделировании (третья глава) послужили причиной более углубленного исследования одной из наиболее значимых характеристик индивидуальных свойств элементов трибосопряжения - микрорельефа поверхности.

Этому вопросу посвящена пятая глава диссертации, включающая:

1. Исследование интенсивности изнашивания поверхности катания колеса в процессе эксплуатации локомотива, общие закономерности изменения которой выявлены в результате многолетних наблюдений за приписным парком тепловозов 2ТЭ116 депо Родаково Донецкой ж.д.

2. Исследование статистических характеристик исходного технологического микрорельефа поверхности катания колеса после финишной токарной обработки, а также микрорельефа, приобретенного в процессе эксплуатации. Последний исследован методом слепков на колесах 40 тепловозов 2ТЭ116, приписанных к локомотивному депо Родаково. Замеры параметров микрогеометрии с полученных слепков выполнены в лаборатории технологического факультета Высшей инженерной школы г.

Цвикау (Германия) с использованием профилометра-профилографа "Talysurf - 5M".

Соответствие реального микрорельефа и воспроизводимого на слепке дополнительно оценивалось путем сопоставления результатов, полученных со слепка и при прямом профилометрировании поверхности металлического темплета, вырезанного из изъятых из эксплуатации бандажа.

3. Исследование влияния режимов силового взаимодействия колеса с рельсом на морфологию микронеровностей контактирующих поверхностей, заключающееся в воспроизведении режимов силового взаимодействия колеса с рельсом с последующим профилометрированием поверхности, до и после реализации данного режима.

Воспроизводились следующие режимы взаимодействия: выбег, торможение, тяга и боксование (без применения и с применением песка). В экспериментах было задействовано два тепловоза ТГМ4 и подвижной состав, состоящий из 18 четырехосных вагонов, общим весом 1000 т.

4. Исследование зарождения и развития макрповреждений рабочей поверхности колеса, выполненного на основе анализа несущей способности поверхностного слоя на двух масштабных уровнях:

- микро, обусловленного пластическим деформированием взаимодействующих между собой микронеровностей;

- макро, обусловленного пластическим течением массы основного материала бандажа.

Полученные результаты исследований заключаются в следующем.

Изнашивание поверхности катания колеса в процессе его эксплуатации, происходит с различной интенсивностью и зависит от пробега локомотива.

Приработка на макро- и микроуровнях завершается к 25-30 тыс. км пробега, после которого следует установившийся износ, с минимальной интенсивностью изнашивания, завершающийся в районе 200 тыс. км. Дальнейшая эксплуатация локомотива характеризуется нарастанием интенсивности изнашивания, вызванной нарушением кинематики взаимодействия колеса с рельсом, а также разрушением поверхностного слоя вследствие накопления дефектов.

Главной характеристикой процесса приработки является трансформация технологического микрорельефа в эксплуатационный, общей закономерностью которой является уменьшение высотных и увеличение шаговых параметров шероховатости и волнистости. При этом увеличивается радиус закругления микронеровностей и снижается радиус закругления их впадин.

Технологическая шероховатость поверхности катания колеса соответствует по ГОСТу 2789-75 4-5 классу (23% наблюдений - 5 класс,

68% - 4 класс). Эксплуатационная шероховатость - 6-8 классу (29% наблюдений - 6 класс, 52% - 7 класс, 10% - 8 класс). Шероховатость носит случайный характер, средний коэффициент вариации высотных параметров - 36%, шаговых - 50%. Распределение значений случайной величины близко к нормальному.

Волнистость поверхности формируется в процессе приработки и соответствует 4-му классу (по классификации Института машиноведения). Отношение максимальной высоты волны к ее шагу

$$W_{\max} / W_{\text{ам}} = 0,039$$

Анализ распределения амплитуд профиля показал, что технологическая шероховатость и волнистость поверхности характеризуется наличием острых вершин и пологих впадин, эксплуатационная - пологих впадин и острых вершин.

По сравнению с обточенной поверхностью на микрорельефе изношенной отсутствует выраженная направленность следов взаимодействия в продольном и поперечном направлениях.

Изменение шероховатости поверхности в пределах 6-8 классов обусловлено влиянием режимов силового взаимодействия колеса с рельсом (выбега, торможения, тяги, с применением и без применения песка, боксования с применением и без применения песка), которые чередуются случайным образом и с различной интенсивностью в процессе эксплуатации локомотива. Соответственно этим режимам дифференцируется степень их влияния на микро топографию поверхности.

Примерно равное влияние на морфологию микронеровностей оказывают режимы выбега, торможения, тяги и тяги с применением песка. Их действие заключается в нивелировании шероховатого слоя.

Режимы взаимодействия колеса с рельсом, за исключением режимов боксования, практически не влияют на характер волнистости. После этих режимов наблюдается профиль волнистости, при котором сохраняются острые впадины и пологие вершины.

Наиболее грубая шероховатость и волнистость наблюдается после режима боксования без применения песка. Визуальный осмотр поверхности позволил выявить глубокое искажение профиля со следами схватывания металла и его напластования.

Искажение профиля катания поверхности колеса, в зависимости от интенсивности режима силового взаимодействия, обусловлено индивидуальными поверхностными свойствами элементов ТС. Возможности воздействия на эти свойства, в целях снижения вероятности макроповреждения поверхности ограничены. Повышение радиуса колеса не оказывает существенное влияние на способность поверхности противостоять макроповреждениям. Наиболее эффективный способ снижения пластической составляющей деформации, равно как и вероятности мак-

роповреждения поверхности, заключается в увеличении твердости НВ материала бандажа. Увеличение на 10% твердости НВ соответствует повышению значения силы, приводящей к макроповреждениям поверхности на 25%, однако это мероприятие необходимо рассматривать во взаимосвязи с влиянием, которое оказывает НВ на фрикционные свойства ТС.

В целях снижения величин приработочного износа целесообразно технологическое обеспечение эксплуатационной микрогеометрии поверхности на стадии обточки бандажей колесных пар.

Технологическое обеспечение оптимального микрорельефа необходимо производить на участках поверхности бандажа, в зависимости от конкретного вида износа:

- при опережающем прокате: поверхность круга катания, включая выкружку и наклонную поверхность гребня;
- при опережающем подрезе гребня: наклонная поверхность гребня и выкружка.

Создание оптимального микрорельефа поверхности обеспечит повышение ресурса бандажей колесных пар локомотивов примерно на 20%.

При назначении технологической операции для окончательной обработки поверхности бандажа необходимо отдавать предпочтение тем операциям, реализация которых позволит обеспечить не только нивелирование поверхности, но также и оптимальную конфигурацию впадин и вершин микронеровностей.

6. Конструкторско-технологическая реализация разработанных рекомендаций

по улучшению эксплуатационных качеств системы "колесо-рельс".

Вопросы практической реализации разработанных в диссертации рекомендаций освещены в шестой главе и затрагивают два направления: создание соответствующих технических средств, обеспечивающих оперативное воздействие на фрикционные свойства колес и рельсов, непосредственно на стадии эксплуатации локомотива и технологическое воспроизведение эксплуатационного микрорельефа поверхности катания колес, способствующее снижению интенсивности их изнашивания.

Реализация первого направления стала возможной с созданием системы управления фрикционными свойствами ТС "колесо-рельс", получившей в технической литературе название - "Устройство для улучшения сцепления колес с рельсами".

В качестве рабочего реагента в устройстве используется кварцевый песок, получивший на железнодорожном транспорте абсолютное распространение, как средство повышения коэффициента сцепления колеса с рельсом.

Главным отличительным признаком созданного устройства, по

сравнению с известными аналогами, является осуществление автоматизированного управления фрикционными свойствами ТС "колесо-рельс" в зависимости от скорости движения, номинальной площади контакта и физико-химического состояния контактирующих поверхностей.

Базовой зависимостью функционирования устройства, главным образом, обуславливающей величину подаваемой в контакт колеса с рельсом массы песка является зависимость производительности песочных форсунок от скорости движения транспортного средства $\Pi = f(V)$.

Целесообразность реализации этой зависимости на практике подтверждается исследованиями особенностей боксования колес тепловоза 2ТЭ116, выполненными на Донецкой железной дороге в осенне-зимний период года. Установлено, что более 95% всех случаев зарегистрированных боксований наблюдается при движении локомотива. Более 50% - на скоростях от 20 до 40 км/ч.

Изменение производительности подачи песка в зависимости от физико-химического состояния контактирующих поверхностей достигается посредством его импульсной подачи в контакт колеса с рельсом, обеспечивающей в короткие отрезки времени, соизмеримые с процессом зарождения и развития боксования, распределение песка по головке рельса переменной насыщенности, минимум и максимум которой соответствует полярным значениям возможных состояний контактирующих поверхностей.

Удовлетворение отмеченным условиям предопределило создание блок-схемы устройства, состоящей из следующих элементов: датчик скольжения колес и скорости движения локомотива; блок управления; песочные форсунки; устройство воздействия на характеристики сыпучести песка.

Блок управления осуществляет реализацию алгоритма управления и диагностики работы устройства и включает подсистемы:

- управления песочными форсунками (преобразователь импульсов скорости; генератор начальной частоты и длительности сигналов; формирователь импульсов управления; стабилизированный источник напряжения; транзисторный ключ);

- автоматической продувки пескоподающих труб после цикла подачи песка (стабилизированный источник низковольтного напряжения; ждущий мультивибратор; транзисторный ключ, реле управления);

- автоматической периодической продувки пескоподающих труб без подачи песка (параметрический стабилизатор, несимметричный мультивибратор, транзисторный ключ, реле управления);

- диагностики работы устройства.

В подсистеме диагностики реализован принцип работы, основой которого является контроль относительной диэлектрической проницае-

мости среды, изменяющейся пропорционально плотности пескоподающей смеси, что в данном случае тождественно производительности песочной форсунки. При снижении контролируемого параметра до критических величин осуществляется переход на аварийный режим работы устройства.

Песочная форсунка выполняет функции исполнительного органа. В форсунке применен электромеханический клапан, высокая надежность которого при работе в абразивной среде обеспечена за счет оптимальной кинематики клапана, при которой реализуется минимальный уровень сил, а следовательно и минимальный износ в контакте отсекаателя с абразивными частицами.

Воздействие на характеристики сыпучести песка осуществляется посредством специального устройства за счет использования вынужденных колебаний наддресоренного строения локомотива. Конструктивно это достигается обеспечением свободы перемещения песочного бункера по закону:

$$Z = \omega_c^2 m,$$

где ω_c - преобладающая частота колебаний подрессоренного строения локомотива;

m - переменная масса бункера.

Наличие структурных элементов обеспечивает следующие функциональные возможности устройства для улучшения сцепления колес с рельсами:

- изменение производительности подачи песка в зависимости от скорости движения локомотива;

- изменение производительности подачи песка в зависимости от характеристик физико-химического состояния контактирующих поверхностей и площади контакта;

- противофаза импульсов подачи песка под левое и правое колесо колесной пары;

- автоматическая продувка, с целью очистки концевых пескоподающих труб после каждого цикла подачи песка;

- автоматическая продувка концевых пескоподающих труб, без подачи песка, через определенные интервалы времени с целью предотвращения скапливания в них снега и остатков песка (режим предназначен для холодной и снежной зимы и при необходимости включает ся машинистом);

- наличие аварийных режимов работы пескоподающей системы на случай отказа исполнительных органов и органов управления;

- непрерывная диагностика работы пескоподающей системы, позволяющая давать оценку соответствия текущих характеристик работы системы нормативным требованиям и принимать решение о переходе на аварийный режим работы;

- наличие специальных устройств препятствующих слеживанию песка, путем непрерывного воздействия на характеристики его сыпучести;

- быстрая и легкоконтролируемая настройка песочных форсунок на требуемую производительность.

Второе направление разработанное в диссертации заключается в технологическом обеспечении оптимального микрорельефа поверхности катания колеса локомотива, посредством ее накатывания стальным роликом.

Целесообразность использования этого метода применительно к триботехнической системе "колесо-рельс" объясняется двойным эффектом, заключающимся в одновременном нивелировании профиля микрорельефа и некоторым упрочнением поверхности, за счет ее пластического деформирования, следствием которого являются остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое.

Главные отличия предлагаемой в данной работе технологии состоят в приоритетности создания оптимального микрорельефа, при котором упрочнение поверхностного слоя является побочным эффектом, а также в избирательном воздействии роликом на участки профиля бандажа в зависимости от характера его естественного износа и с целью обеспечения опережающего роста проката колеса.

Заключение

Достижение цели, сформулированной в диссертации, предопределило решение одной из актуальных проблем железнодорожного транспорта, заключающейся в обеспечении высоких потенциальных фрикционных свойств триботехнической системы (ТС) "колесо-рельс" и создании условий для их полной реализации непосредственно в режиме тяги локомотива.

Выполненные комплексные экспериментально-теоретические исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Индивидуальные микрогеометрические свойства элементов ТС, наряду с причинами обусловленными их физико-химической природой и эволюцией свойств в процессе изготовления и эксплуатации, претерпевают существенные изменения в результате однократного акта силового взаимодействия и носят, преимущественно, обратимый характер. Изменение свойств элементов ТС зависит от знака напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя и характеризуется закономерностью роста комплексных критериев шероховатости и волнистости на участках действия напряжений сжатия, в основе которого лежит увеличение высотных, снижение шаговых параметров микрогеометрии и снижение радиусов закругления вершин микронеровностей. При напря-

жения растяжения наблюдается противоположная тенденция, с менее выраженной интенсивностью.

Эффект изменения индивидуальных микрогеометрических свойств поверхности зависит от исходных размеров микронеровности и усиливается с уменьшением отношения высоты микронеровности к ее основанию. В связи с этим, действие этого эффекта более существенно при повышении класса шероховатости и волнистости.

2. Изменения геометрических размеров микронеровностей вследствие их деформирования влияют на свойства шероховатого слоя противостоять местным пластическим деформациям, возникающим при внедрении в него контртела и характеризуются увеличением микротвердости поверхности с ростом высотных и уменьшением шаговых параметров микрогеометрии поверхности.

3. Фрикционные свойства системы "колесо-рельс" находятся в функциональной связи с индивидуальными свойствами ее элементов и проявляются в зависимости от условий приложения внешних силовых факторов.

Одновременное действие по отношению к триботехнической системе, нормальной и тангенциальной сил ужесточает условия формирования фрикционных свойств ТС. Главной характеристикой этого процесса является увеличение степени локализации силового взаимодействия на вершинах микронеровностей и связанное с этим, уменьшение фактической площади касания поверхностей колеса и рельса, что вызывает рост нормальных и касательных напряжений на пятнах микроконтактов.

Оценка напряженно-деформированного состояния области контакта ТС "колесо-рельс" по критерию соответствия внешних условий и индивидуальных свойств взаимодействующих элементов показала, что его уровень обусловлен интерференцией деформаций, вследствие микроконтактных процессов. Для данных условий взаимодействия элементов системы относительное сближение между поверхностями постоянно и равно $h_{\text{ср}} = 0,4$. Среднее абсолютное сближение $h_{\text{ср}}$ функционально зависит от действия тангенциальной силы, с ростом которой, в силу закономерностей деформирования микрорельефа, $h_{\text{ср}}$ увеличивается.

4. Анализ результатов исследования показал, что при математическом моделировании и инженерных расчетах необходимо учитывать функциональную связь между входом системы, индивидуальными свойствами ее элементов и фрикционными свойствами ТС. Предложены эмпирические коэффициенты, использование которых целесообразно при определении предельных характеристик трения и изнашивания поверхностей колеса и рельса.

5. Предложены математические модели триботехнической системы "колесо-рельс", характеризующие ее "выход" в зависимости от фрикци-

онных свойств ТС и индивидуальных свойств взаимодействующих элементов, выраженных в функциях "входа" системы.

Учет в математических моделях установленных закономерностей физико-химической механики контактного взаимодействия поверхностей твердых тел позволил повысить адекватность модели реальному объекту, а также оценить влияние конструктивных, технологических, материаловедческих и эксплуатационных факторов на выходные характеристики функционирования ТС применительно к условиям одновременного действия, по отношению к системе, нормальной и тангенциальной сил.

6. Анализ силового взаимодействия элементов триботехнической системы "колесо-рельс" позволил выделить в структуре ее выходных характеристик компоненты, функционально зависящие от условий действия входа системы и характеризующие потенциальные фрикционные свойства ТС, реализация которых в условиях эксплуатации зависит от пьезокоэффициента молекулярной составляющей трения и прочности на сдвиг молекулярной связи, являющихся функцией физико-химического состояния контактирующих поверхностей.

В этих условиях нагружение системы нормальной и тангенциальной силами, с ростом последней, приводит к снижению роли молекулярной составляющей коэффициента сцепления, вследствие увеличения напряжений на пятнах микроконтактов и повышению механической составляющей за счет увеличения величины внедрения микронеровностей. Увеличение отношения величины внедрения микронеровности к радиусу закругления ее вершины обеспечивает интенсивный рост $\gamma_{\text{мех}}$.

7. Анализ особенностей формирования напряженного состояния области контакта показал, что дальнейшее повышение нормальной нагрузки с целью реализации длительной силы тяги на ободу колеса является нецелесообразным в отношении сцепных качеств колес и интенсивности изнашивания их поверхностей. Повышение нормальной нагрузки способствует снижению коэффициента сцепления (за счет его молекулярной составляющей) и повышению интенсивности изнашивания.

Снижение давлений в контакте - наиболее актуальная задача для локомотивостроения, решение которой будет способствовать уменьшению контактно-усталостных дефектов поверхностей, повышению коэффициента сцепления и снижению интенсивности изнашивания. Эффективным средством достижения этого, без снижения уровня нормальной нагрузки, является увеличение радиуса колеса, равно как и изменение его профиля, обеспечивающее возрастание площади контакта.

8. Повышение коэффициента сцепления за счет интегрального показателя свойств материала - твердости по Бринеллю, возможно при условии увеличения разности между твердостями элементов ТС, что обеспечит внедрение более твердых микронеровностей в менее твердое

контртело. Реализация коэффициента сцепления, в этом случае, будет осуществляться преимущественно за счет $f_{\text{мех}}$. Износ поверхностей взаимодействующих элементов распределится обратнопропорционально их твердости.

9. Повышение коэффициента сцепления $f_{\text{сц}}$ на стадии создания локомотива осуществляется, главным образом, за счет его молекулярной составляющей $f_{\text{мол}}$, что не гарантирует стабильной реализации $f_{\text{сц}}$ в условиях эксплуатации. Это объясняется высокой чувствительностью $f_{\text{мол}}$ к физико-химическому состоянию поверхностей взаимодействующих элементов ТС, изменяющегося в широких пределах. В связи с этим достижение высоких значений коэффициента сцепления в условиях эксплуатации предполагает оперативное управление фрикционными свойствами ТС "колесо-рельс", осуществление которого возможно при условии размещения в контакте реагентов, имеющих низкую инерционность, соизмеримую со временем контактирования и обеспечивающих направленное воздействие на физико-химическое состояние поверхностей колес и рельсов.

На практике это достигается путем избирательной подачи в зону контакта абразивных частиц песка, при этом повышение коэффициента сцепления осуществляется преимущественно за счет его механической составляющей.

10. Установлено, что максимальная способность песка в передаче тангенциальных усилий наблюдается при условии размещения его оптимального количества, для данных условий взаимодействия, на границе раздела "колесо-рельс".

Максимум коэффициента сцепления колеса с рельсом достигается на сухих рельсах, при размещении в контакте такого количества песка, продукт разрушения которого создаст монослой. Экспериментально это подтверждается нарушением электропроводности контакта, в момент реализации максимума по сцеплению. Данным условиям соответствует размещение в контакте массы песка $M = 0,13 \cdot 10^{-4}$ кг (при $R_k = 115$ кН). Для замазленного состояния поверхностей необходимо примерно трехкратное увеличение массы песка, по сравнению с сухими поверхностями.

Рост нормальной нагрузки для всех величин насыщенности песка на границе раздела тел, приводит к снижению электросопротивления контакта, что объясняется сближением металлических поверхностей вследствие разрушения и внедрения частиц песка.

11. Наибольший эффект в повышении $f_{\text{сц}}$ будет наблюдаться при уменьшении размеров абразивных частиц, до величин f_{min} обусловленных внедрением во взаимодействующие поверхности и толщиной присутствующих на них загрязнений.

Износ поверхностей, для данных условий взаимодействия элементов, будет определяться усталостными процессами вследствие передоформирования материала абразивными частицами.

12. Учитывая эффект интерференции деформаций при внедрении абразивных частиц в металлические поверхности и связанное с этим резкое увеличение давлений на частицу, результатом которого является разрушение абразивных частиц до более мелких размеров чем r_{min} , размещение абразивных частиц в контакте должно соответствовать такой их насыщенности при которой расстояние между частицами равно не менее трем их радиусам. В этом случае создаются наилучшие условия для проникновения абразивной частицы в контртело, при этом надежность механического зацепления поверхностей будет определяться способностью частиц противостоять разрушению. При прочих равных условиях, в передаче тангенциальных усилий более эффективны сыпучие материалы выдерживающие большие разрушающие нагрузки.

13. В целях снижения величин приработочного износа целесообразно технологическое обеспечение эксплуатационной микрогеометрии поверхности на стадии обточки бандажей колесных пар.

Технологическое обеспечение микрорельефа необходимо производить на участках поверхности бандажа, в зависимости от конкретного вида износа:

- при опережающем прокате: поверхность круга катания, включая выкружку и наклонную поверхность гребня;
- при опережающем подрезе гребня: наклонная поверхность гребня и выкружка.

Создание оптимального микрорельефа поверхности обеспечит повышение ресурса бандажей колесных пар локомотивов примерно на 20%.

14. При постоянстве скольжения колес относительно рельсов температура в контакте увеличивается пропорционально росту нормальной нагрузки. Исходное физико-химическое состояние поверхностей оказывает влияние на уровень температуры лишь в начальный период нагружения. Экспериментально установлено, что для условий взаимодействия колеса тепловоза 2ТЭ116 с рельсом, температура поверхности при срыве в боксование составляет свыше 700°С.

15. Экспериментальная проверка ключевых положений сформулированных в диссертации выполнена на натурной стендовой установке, воспроизводящей условия силового взаимодействия колеса с рельсом в реальном масштабе сил, времени, геометрических размеров, тепловых потоков, а также физико-химического состояния контактирующих поверхностей. Исследование подтвердило адекватность разработанных моделей реальному объекту. Сходимость теоретически прогнозируемых и экспериментально полученных характеристик силового взаимодей-

твия колеса с рельсом находится в пределах 5-20%.

16. Создано "Устройство для улучшения сцепления колес с рельсами", обеспечивающее автоматизированное управление фрикционными свойствами ТС "колесо-рельс" за счет дозированной подачи песка в контакт в зависимости от скорости движения, давлений в контакте и физико-химического состояния контактирующих поверхностей. Эффективность устройства, по сравнению с серийной базовой системой, характеризуется повышением коэффициента сцепления колес с рельсами на 10-15% при одновременной экономии песка в три-пять раз.

Новизна технических решений реализованных в устройстве защищена патентом Франции № 9110557 и одинадцатью авторскими свидетельствами на изобретения (конструкция песочной форсунки - а.с. СССР № 1667324, 1667325, 1667326, 1409499, 1650500, а.с. по заявкам № 448085, 4650891, 4702968, регулировка производительности - а.с. СССР по заявке № 4953226, подсистема диагностики работы устройства - а.с. СССР № 1781112, подсистема воздействия на характеристики сыпучести песка - а.с. СССР № 1418133).

Основные положения диссертации отражены в работах:

1. Прогнозирование и управление характеристиками сцепления колеса с рельсом/Осенин Ю.И. Монография. -К.: "ВІПОЛ", 1993. - 100 с.
2. Патент Франции № 9110557. Песочница локомотива. Осенин Ю.И., Коляев А.Н., Голубенко А.Л., Меликджанов Г.С. и др. 1994.
3. Osenin J.I. et. al. Locomotive sander. KokaJ TokkoJ Koko/Ed. the Patent Office. - Tokyo. -1993.
4. Osenin J.I. u.a. Sandstreuer fur eine Lokomotive. Patentblatt/Herausgegeben von Deutschen Patentamt. -Munchen. -1993. - 16S.
5. Osenin J.I. et. al. Locomotive sander. The Official Journal/Ed. the Patent Office. - London. - 1993.
6. Осенин Ю.И. Оценка сцепных свойств поверхностей катания локомотивных колес/Ворошиловгр. машиностр. ин-т. Ворошиловград, 1987. -11 с.: ил. -деп. в ЦНИИТЭИТЯЖМАШ. 11.02.87. №1867-тм.
7. Осенин Ю.И. Повышение коэффициента сцепления колес локомотива с рельсами в условиях высоких контактных давлений/Автореф. дис... канд. техн. наук. -М., 1988.
8. Осенин Ю.И. Повышение использования ресурса бандажей колесных пар локомотива/Луганск. машиностр. ин-т. ЦНИИТЭИТЯЖМАШ, 1990. №650-тм.
9. Осенин Ю.И. Влияние нормальной нагрузки на характеристики напряженного состояния области контакта колеса локомотива с рельсом. - Деп. в ЦНИИТЭИТЯЖМАШ. - 1987. - № 2091 тм. - 11 с. ил. - Библиогр.: -Рус. - Деп.
10. Осенин Ю.И., Малахова Г.И. Корректировка определяемых параметров микрогеометрии поверхностей сложноподвижных пар трения/Управление качеством уплотнений и метрологическое обеспечение процессов механообработки/Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Пенза, 1991.
11. Михин Н.М., Осенин Ю.И. Влияние напряженного состояния области контакта твердых тел на параметры шероховатости и волнистости их поверхностей// Проблемы трения и изнашивания/ Респ. межв. научн. техн. сб. - Киев: Техника, 1988. -Вып. 34.
12. Осенин Ю.И., Сапронова С.Ю., Клывев А.С. Влияние абразив-

- ных частиц на коэффициент сцепления поверхностей колеса и рельса/Износостойкость машин/Тез. докл. науч.-техн. конф. - Брянск. 1991.
13. Осенин Ю.И., Сапронова С.Ю., Шведчикова И.А. Предупреждение макроповреждений поверхности катания бандажа локомотивного колеса/Луган. машиностр. ин-т. - Луганск, 1992 - 97 с.: ил. - Библиогр.: 4 наз. - Рус. - Деп. в УкрИНТЭИ. 20.10.92. № 1697 - Ук 92.
14. Осенин Ю.И., Марченко Д.Н., Крамарь Н.М. Оценка фрикционного состояния поверхности колеса по температуре скольжения контакта/Проблемы развития локомотивостроения/Тез. докл. IV Международная науч.-техн. конф. с. 36.
15. Осенин Ю.И., Малахова Г.И., Стерхова Л.Н., Чернышева Е.А. Исследование эксплуатационных свойств экологически улучшенной смазки для тяговых редукторов тепловозов/УкрНИИТИ, № 1319 - Ук90. 16.08.90.
16. Осенин Ю.И., Клюев А.С. К вопросу о повышении тяговых качеств локомотивов/Системы и узлы перспективных тепловозов. - Киев. УМК ВО/Сб. науч. тр. 1990. с. 5-7.
17. Осенин Ю.И., Клюев А.С. Механизм силового взаимодействия колеса локомотива с рельсом/Состояние и перспективы развития локомотивостроения/Тез. научн.-техн. конф. - Новочеркасск, - 1994.
18. Голубенко А.Л., Осенин Ю.И. Влияние макро- и микрогеометрических характеристик контакта колеса с рельсом на тяговые свойства тепловозов/-К., 1986. - 17 с. ил. - Библиогр.: -Деп. в УкрНИИТИ, -N 686.
19. Голубенко А.Л., Осенин Ю.И., Протасов А.В., Крамарь Н.М. Исследование процессов, протекающих в зоне контакта колеса локомотива с рельсом//Создание и техническое обслуживание локомотивов большой мощности/Тез. докл. Всесоюз. научн.-техн. конф. - Ворошиловград, 1985. - С. 111.
20. Голубенко А.Л., Крамарь Н.М., Осенин Ю.И., Ткаченко В.П. К вопросу о математическом описании поперечных колебаний рельсовых единиц железнодорожного транспорта/Конструирование и производство транс. машин. - Харьков: Вища школа, 1981. -С. 21-28.
21. Коняев А.Н., Протасов А.В., Осенин Ю.И. О сцеплении колеса с рельсом при наличии в контакте твердых частиц/Конструирование и производство трансп. машин. - Харьков: Вища школа, 1986. -Вып. 18. - С. 13-16.
22. Коняев А.Н., Осенин Ю.И., Марченко Д.Н. Влияние режима контактирования смазочного элемента на характеристики трения/Луган. машиностр. ин-т. -Луганск, 1992 - 9 с.: ил. -Библиогр. 3 назв. -Рус. -Деп. в УкрИНТЭИ. 15.10.92. № 1609 - Ук 92.
23. Коняев А.Н., Осенин Ю.И., Марвин В.В. Повышение долговечности бандажей колесных пар локомотива/Изд-во КМС ВСНТО. Проблемы повышения качества, надежности и долговечности машин/Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Брянск, 1990. 82 с.
24. Осенин Ю.И., Клюев А.С., Кудла П.И., Волощенко А.Н. Повышение технико-экономической эффективности пескоподающей системы локомотива/Изд-во КМС ВСНТО. Проблемы развития локомотивостроения/Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. -Луганск, 1990. 77 с.
25. Михин Н.М., Осенин Ю.И., Крамарь Н.М. Микродеформации поверхности твердого тела в предконтактной зоне при фрикционном взаимодействии /Износостойкость машин/Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Брянск. 1991. 53-60.
26. Михин Н.М., Осенин Ю.И. Оценка сцепных возможностей колес и рельсов в конструкциях перспективных локомотивов/Изд-во КМС ВСНТО. Методы и средства диагностирования технических средств железнодорожного транспорта./Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. -Омск, 1984 г. -С. 139-140.
27. Осенин Ю.И., Марченко Д.Н., Крамарь Н.М., Клюев А.С. Сни-

жение энергии неупорядоченного процесса при реализации сцепления колеса с рельсом/Проблемы развития локомотивостроения/Тез. докл. IV Международная науч.-техн. конф. с. 39.

28. Осенин Ю.И. Прогнозирование и управление характеристиками сцепления колеса с рельсом/Луган. машиностр. ин-т. -Луганск, 1993. -91 с.: ил. -Библиогр. 41 наз. -Рус. -Деп. в ГНТБ Украины 10.06.93 № 1126 -Ук 93.

29. Михин Н.М., Осенин Ю.И. Механизм формирования напряженного состояния области контакта колеса с рельсом в режиме тяги локомотива/Изд-во КМС ВСНТО. Обеспечение надежности узлов трения машин./Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. -Ворошиловград, 1988. -с. 118.

30. Михин Н.М., Коняев А.Н., Осенин Ю.И. Влияние крутящего момента на соотношение между механической и молекулярной составляющими коэффициента сцепления колеса с рельсом/Изд-во КМС ВСНТО. Проблемы развития локомотивостроения/Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. -Луганск, 1990. 76 с.

31. Михин Н.М., Коняев А.Н., Осенин Ю.И. Изменение условий взаимодействия колес с рельсами с целью повышения сцепных свойств локомотива//Проблемы механики ж.д. транспорта/Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. -Днепропетровск, 1988. -с. 56.

32. Разработка редукторных смазок с улучшенными эксплуатационными свойствами: Отчет о НИР/Луганск. машиностр. ин-т.: Научн. рук. Ю.И. Осенин - ГР № 01880063153 - 1990. -52 с.

33. Повышение эффективности и экономичности системы увеличения коэффициента сцепления колес локомотива с рельсами: Отчет о НИР /Луганск. машиностр. ин-т.: Научн. рук. Ю.И. Осенин - ГР № 01890025883 - 1992. - 74 с.

34. Марченко Д.Н., Осенин Ю.И., Малахова Г.И. Разработка эффективного способа смазывания гребня колеса железнодорожного экипажа/Проблемы развития локомотивостроения/Тез. докл. IV Международная науч.-техн. конф. с. 34.

35. Коняев А.Н., Осенин Ю.И., Марченко Д.Н. Шведчикова И.А. Коэффициент сцепления колеса с рельсом при наличии в зоне контакта частиц песка/Луган. машиностр. ин-т. -Луганск, 1993. -15 с.: ил. -Библиогр. 2 наз. -Рус. -Деп. в ГНТБ Украины 10.06.93 №.... -Ук93.

36. Разработка, изготовление, стендовые и эксплуатационные испытания устройства для повышения коэффициента сцепления//Отчет о НИР. Ворошиловград. машиностр. ин-т./Научн. рук. А.Л. Голубенко, отв. исполн. Ю.И. Осенин; ГР № 01830025456, - 1986. 320 с.

37. Марченко Д.Н., Осенин Ю.И., Горбунов Н.И., Чесноков В.Н., Крамарь Н.М., Тихонюк Г.П. Повышение эффективности и экономичности системы гребнесмазывания локомотива/Тез. докл. науч.-техн. конф. -Новочеркасск, - 1994.

38. А.с. СССР № 1667324, МКИ В 61С 15/10, В 60В 39/04. Устройство для подачи абразивного материала под колеса локомотива/Осенин Ю.И., Ткаченко В.П., Коняев А.Н., Голубенко А.Л., Меликджанов Г.С., Гринюк Г.Н., Балесков И.А.; Ворошиловградский машиностроит. ин-т. - Приоритет 15 сентября 1986 г.

39. А.с. СССР № 1667325, МКИ В 61С 15/10, В 60В 39/04. Устройство для подачи абразивного материала под колеса локомотива/Осенин Ю.И., Ткаченко В.П., Протасов А.В., Коняев А.Н., Голубенко А.Л., Балесков И.А., Кutowой В.Н.; Ворошиловградский машиностроит. ин-т. - Приоритет 18 июля 1986 г.

40. А.с. СССР № 1662326, МКИ В 61С 15/10. Песочница локомотива/Осенин Ю.И., Ткаченко В.П., Протасов А.В., Коняев А.Н., Голубенко А.Л., Балесков И.А., Кutowой В.Н.; Ворошиловградск. машиностроит. ин-т. - Приоритет 16 мая 1986 г.

41. А.с. СССР № 1409499, МКИ В 61С 15/20. Песочница локомо

тива/Ткаченко В.П., Осенин Ю.И., Коняев А.Н., Голубенко А.Л., Кулешов А.Г.; Ворошиловградск. машиностроит. ин-т. - Приоритет 20 мая 1986 г.

42. А.с. СССР №1176199, МКИ С 01М 17/00. Устройство для определения положения колесной пары в рельсовой колее/ Крамарь Н.М., Голубенко А.Л., Ткаченко В.П., Осенин Ю.И. и др. 7.12.83.

43. А.с. СССР №1206153, МКИ В 60В 35/14. Упругая муфта/ Коняев А.Н., Горбунов Н.И., Осенин Ю.И., Михайлов Е.В. и др. 22.06.84.

44. А.с. СССР №1418133 МКИ В 61С 15/10. Песочница локомотива/ Осенин Ю.И., Голубенко А.Л., Коняев А.Н., Ткаченко В.П., Крышталь Н.В. и др. 26.02.87.

45. А.с. СССР по заявке №4480785 МКИ В 61С 15/10. Песочница локомотива/ Осенин Ю.И., Коняев А.Н., Август В.В., Голубенко А.Л. и др. 24.03.89 г.

46. А.с. СССР №1650500 Песочница локомотива/ Август В.В., Осенин Ю.И., Голубенко А.Л., Балесков И.А. и др. 20.12.89.

47. А.с. по заявке №4936912/11 "Устройство для смазки гребня колеса ж.д. экипажа" Осенин Ю.И., Марченко Д.Н., Коняев А.Н., Голубенко А.Л., Август В.В., Михин Н.М. 23.03.92 г.

48. А.с. СССР по заявке №4650891/27-11 (025390) Песочница локомотива/ Осенин Ю.И., Коняев А.Н., Голубенко А.Л., Август В.В. и др. 20.12.89 г.

49. А.с. № 1781964 Песочница локомотива/ Осенин Ю.И. Бюл. изобр., 1992. - № 46.

50. А.с. СССР по заявке 4702968/31-11 (079544) Песочница локомотива/Осенин Ю.И., Михин Н.М., Голубенко А.Л., Август В.В., Ключев А.С. 24.01.90 г.

51. А.с. № 4953226/11 043069. Песочница локомотива / Осенин Ю.И., Ключев А.С., Кудла П.И., Голубенко А.Л., Август В.В., Бакин Н.Н. 22.05.91.

Осенин Ю.И.

Подписано к печати 26.04.94 г. Формат 1/16 60x84 п.л. 2,4
Заказ 264. Тираж 100

Отпечатано на участке оперативной полиграфии ВУГУ
348034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20а