

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС
ГУП «ФАН ВА ТАРАККИЁТ»
ПРИ ТАШКЕНТСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ
УНИВЕРСИТЕТЕ имени АБУ РАЙХАНА БЕРУНИЙ

На правах рукописи
УДК 620.178.16.001.2

Хачатурьян Станислав Валентинович

КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ
ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Специальность: 05.02.04 – Трение и износ в машинах

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Ташкент - 2008

Работа выполнена на кафедре «Основы конструирования машин» Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта и в НИЛ «Трибология и механохимия гетерогенных систем» НТК ГУП «Фан ва тараккиёт» при ТГТУ им. А. Беруни.

Научный консультант:

академик АН РУз, д.т.н., профессор
Негматов С. С.

Официальные оппоненты:

академик АН РУз, д.т.н., профессор
Лебедев О. В.

академик АН РУз, д.т.н., профессор
Йулдашев Ш. У.

д.т.н., профессор Махкамов К. Х.

Ведущее предприятие

Ташкентский автомобильно-
дорожный институт

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2008г. в _____ часов на заседании разового специализированного ученого совета Д 067.50.01 по специальности 05.02.04. — «Трение и износ в машинах» в Научно-технологическом комплексе ГУП «Фан ва тараккиёт» при ТашГТУ по адресу: 100174, г. Ташкент, ул. Мирза Голиба, 7-а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Научно-технологического комплекса «Фан ва тараккиёт».

Автореферат разослан «_____» _____ 2008г.

Ваш отзыв на реферат в двух экземплярах, заверенный гербовой печатью, просим направить по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря Специализированного совета. Тел. 246-39-28. Факс 118-92-75.

Ученый секретарь

Специализированного совета, к.х.н.

Бабаханова М.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность работы. Выступая на XIV сессии Олий Мажлиса Республики Узбекистан первого созыва, И.А. Каримов выделил шесть пунктов по структурным преобразованиям в экономике республики, в которых указывается на необходимость ускоренного развития наукоёмких производств, таких как автомобилестроение, самолетостроение, железнодорожный транспорт и др.

Одной из важнейших концепций глубокой перестройки хозяйственного механизма Республики Узбекистан является создание эффективной и гибкой системы экономического развития и реализация на этой основе программы повышения технического уровня и качества машин с увеличением их экономичности, производительности и долговечности на основе научного подхода к вопросам проектирования и изготовления техники.

Долговечность машин и механизмов в значительной степени определяется работоспособностью узлов трения. Узел трения – самое слабое звено машин и механизмов. Как известно, до 70% отказов машин происходит из-за недостаточной работоспособности узлов трения.

Эффективность производства и эксплуатации машин и механизмов должна закладываться в процессе их проектирования. В настоящее время инженер-конструктор, сидя за письменным столом, может рассчитать прочность конструкции машины, но не может надежно прогнозировать долговечность узлов трения в процессе эксплуатации. Поэтому в практике проектирования трибосопряжений приходится проводить длительные и дорогостоящие лабораторные, стендовые и эксплуатационные испытания, что удорожает и затягивает процесс проектирования машин и механизмов.

В связи с вышеизложенным разработка расчетных методов оценки износостойкости трибосопряжений является весьма **актуальной**.

Степень изученности проблемы. К настоящему времени учеными много сделано и делается для борьбы с трением и изнашиванием. Однако природа внешнего трения еще недостаточно изучена, из-за сложности и многофакторности процессов, происходящих в зоне трения. Это является одной из причин того, что к настоящему времени не разработано достаточно надежных методик для расчета износостойкости трибосопряжений и долговечности деталей машин.

Связь диссертационной работы с тематическими планами НИР. Диссертационная работа проводилась в соответствии с «Единым комплексным планом повышения технического уровня кампании «Узбекистон Темир Йуллари» по оздоровлению железнодорожного пути и Государственной программой фундаментальных научных исследований Ф–2.1.40 «Исследование термодинамических параметров структурно-энергетических закономерностей фрикционного взаимодействия» (2003-2007 г.г.)

Цель исследования. Теоретическое и экспериментальное исследование закономерностей процесса разрушения поверхностных слоев металлических материалов при трении с использованием термодинамического подхода и разработка расчетно-аналитических методов прогнозирования износостойкости трибосопряжений на стадии их проектирования и изготовления.

Задачи исследования:

- теоретически исследовать возможность использования термодинамического подхода к оценке изнашивания при внешнем трении;
- разработать методики и средства проведения экспериментальных исследований энергетического и энтропийного баланса процесса изнашивания о закрепленные абразивные частицы;
- экспериментально исследовать и провести анализ взаимной связи закономерностей изнашивания с термодинамическими (энергетическими и энтропийными) характеристиками процесса фрикционного взаимодействия;
- проверить достоверность различных термодинамических критериев поверхностной прочности металлических материалов при трении, предложенных другими авторами, с использованием прямых экспериментальных методов исследования;
- разработать методы оценки:
 - износа сопряжений на основе синтеза энтропийного подхода и кинетической концепции разрушения материалов, в частности, для прогнозирования износостойкости рельса;
 - относительной абразивной износостойкости материалов на основе коэффициента деформационного упрочнения;
 - относительной износостойкости рельсов при помощи энергоемкости материала при пластической деформации.
- на основе комплексных исследований процесса трения и изнашивания с термодинамических позиций разработать инженерные методы расчета износостойкости трибосопряжений на стадии проектирования и изготовления.

Объект и предмет исследования. Оценка изнашивания трибосопряжений, работающих в условиях абразивной среды, и трущихся пар, в которых процесс трения не сопровождается химическим взаимодействием с окружающей средой, в частности, для расчета износа рельса, а также оценка относительной износостойкости рельсов.

Методы исследований. Теоретические методы исследования построены на энергетической, энтропийной и энтропийно-кинетической моделях изнашивания с привлечением достижений теории дислокаций, классической и неравновесной термодинамики и кинетической теории разрушения твердых тел.

При проведении экспериментальных исследований определялись составляющие энергетического и энтропийного балансов методом проточного калориметра, закономерности процесса абразивного изнашивания, а также температура на поверхности трения методом разомкнутой термопары.

Экспериментальные данные обрабатывались методами математической статистики и сопоставлялись с данными других исследователей.

Основные положения, выносимые на защиту:

— разработанные теоретические положения, основанные на термодинамическом (энергетическом и энтропийном), дислокационном и термоактивационном подходах к процессу изнашивания материалов при внешнем трении, которые позволили получить аналитические зависимости и предложить критерии для оценки износостойкости трибосопряжений;

— созданные новые устройства и методику проведения экспериментальных исследований;

— результаты экспериментальных исследований энергетического и энтропийного балансов процесса абразивного изнашивания, позволившие установить глубокую взаимную связь изнашивания с термодинамическими характеристиками процесса трения;

— разработанные на основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований методы расчета износостойкости трибосопряжений.

Научная новизна работы:

— впервые проведены теоретические исследования процесса разрушения поверхностных слоев металлических материалов при внешнем трении с использованием термодинамических, дислокационных и термофлуктуационных представлений, позволившие увязать износостойкость трибосопряжений с термодинамическими характеристиками процесса трения и изнашивания. Получены аналитические зависимости, являющиеся научно-методологической основой прогнозирования и оценки работоспособности трибосопряжений и предложен ряд новых, термодинамических критериев для оценки изнашивания:

- критическая плотность внутренней энергии;
- критическая плотность производства энтропии, связанной с необратимыми процессами в поверхностных слоях пары трения;
- энергоемкость материала при пластической деформации;
- коэффициент деформационного упрочнения;

— на основе синтеза молекулярно-кинетического и энтропийного подходов к проблеме трения и изнашивания получена аналитическая зависимость для оценки износостойкости трибосопряжений, процесс фрикционного взаимодействия которых не осложнен химическим

воздействием окружающей среды (в частности, для оценки износостойкости рельса);

— теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены новые свойства и закономерности поверхностного разрушения металлических материалов, заключающиеся в том, что разрушение происходит по мере накопления в деформируемых объемах пары трения плотности внутренней энергии и плотности энтропии предельной (критической) величины. Показано, что эти характеристики следует принимать в качестве критериев для оценки износостойкости, т. к. они не зависят от режимов трения и являются константами материала, численно совпадающими с его теплофизическими свойствами, соответственно, с теплотой плавления и энтропией плавления материала.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Результатом проведенных теоретических и экспериментальных исследований явилась разработка инженерных методов расчета износостойкости трибосопряжений на стадии проектирования и изготовления, что позволяет получить существенный экономический эффект и повысить качество подготовки инженеров.

Полученные теоретические и экспериментальные результаты исследования являются определенным вкладом в развитие науки о трении и износе в машинах.

Реализация результатов. Разработанная автором «Методика оценки эксплуатационной стойкости термоупрочненных рельсов» издана как нормативный документ и принята к внедрению Государственной инспекцией Республики Узбекистан по надзору за безопасностью железнодорожных перевозок «УЗГОСЖЕЛДОРНАДЗОР» и рекомендована для использования предприятиями магистрального и промышленного железнодорожного транспорта с целью проведения экспертной оценки эксплуатационной стойкости предлагаемых для приобретения рельсов в условиях тендера.

Научные разработки внедрены в Государственной Акционерной Железнодорожной Компании «УЗБЕКИСТОН ТЕМИР ЙУЛЛАРИ». Экономический эффект от внедрения результатов исследования на строящемся участке железной дороги Ташгузар - Кумкурган составил 4,06 млрд. сум.

Материалы методического пособия «Термодинамический метод расчета износостойкости деталей машин» включены в учебные программы дисциплин: «Износостойкость машин», «Износостойкость и ресурс машин» для магистров по специальностям: «Подъемно – транспортные машины», «Строительные и дорожные машины» в Ташкентском институте инженеров железнодорожного транспорта и «Тракторы» и «Сельскохозяйственные машины и оборудование» в

Ташкентском Государственном Техническом Университете, а также в Андижанском Государственном Университете.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на: Всесоюзной конференции по трению и изнашиванию. Киев, 1970 г.; Международной конференции по подшипникам скольжения. ЧССР, Высокие Татры, 1972 г.; Всесоюзной конференции по трению, износу и смазке. Ташкент, 1975 г.; Международном симпозиуме по посадкам скольжения. ЧССР, Братислава, 1977г.; VII Всесоюзном симпозиуме по механохимии и механоэмиссии твердых тел. Ташкент, 1979 г.; V Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике, Алма – Ата, 1981 г.; II Всесоюзном съезде по теории механизмов и машин. Одесса, 1982 г.; Международной конференции «Трение, износ и смазочные материалы». Ташкент, 1985 г.; I конференции «Сильно возбужденное состояние в кристаллах». Томск, 1988 г.; конференции «Триботехника машиностроению». Москва, 1989 г.; конференции «Научные и прикладные проблемы теории трения и изнашивания» Харьков, 1989 г.; конференции «Структурная самоорганизация и оптимизация триботехнических характеристик конструкционных и инструментальных материалов». Тернополь, 1990 г.; конференции «Современные методы термической, химико – термической обработки и поверхностного упрочнения деталей машин и инструмента.» Ташкент, 1990 г.; конференции «Триботехника - машиностроению». Нижний Новгород, 1991 г.; Международной конференции «Проблемы механики и сейсмостойкости сооружений». Ташкент. 2004 г.; конференции «Актуальные проблемы развития наземной транспортной системы». Ташкент. 2004 г.; III Международном симпозиуме по транспортной триботехнике: «Повышение износостойкости и долговечности машин и механизмов на транспорте».— С - Петербург, 2005 г.; на Республиканской научно-технической конференции «Новые технологии получения композиционных материалов на основе местного сырья и их применение в производстве»- Ташкент, 2005 г.; на объединенном научном семинаре кафедры «Основы конструирования машин» ТашИИТа и НТК «Фан ва тараккиет» при ТГТУ, 2006г.. объединенном семинаре «Теория механизмов и машин хлопкового комплекса им. Х.Х. Усманходжаева» Института механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева АН РУз 2007 г., научном семинаре НТК «Фан ва тараккиет» при ТГТУ, 2007 г., научно-техническом семинаре Ташкентского автомобильно-дорожного института, 2007 г., научном семинаре при факультете «Автоматизация и механизация водного хозяйства» Ташкентского института мелиорации и ирригации, 2007 г.

Опубликованность результатов. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 56 работах, в том числе 1 учебном пособии, 1 брошюре, 18 журнальных статьях, в 34 сборниках

печатных трудов и тезисов научных конференций и получено 2 свидетельства в Патентном Ведомстве Республики Узбекистан.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав с выводами, общих выводов, списка литературы и приложений. Основное содержание изложено на 266 страницах компьютерного текста и включает 33 рисунка, 18 таблиц, список литературы из 260 наименований, а также приложения на 71 страницах.

Автор посвящает работу памяти своего учителя профессора Федорова В.В. и выражает глубокую признательность и благодарность академику АН РУз, Негматову С. С. за научные консультации, а также заведующему кафедрой «Основы конструирования машин» ТашИИТа академику АН РУз Глуценко А.Д. и заведующему НИЛ «Трибология и механохимия гетерогенных систем» НТК «Фан ва тараккият» при ТашГТУ д.т.н., профессору Джумабаеву А. Б. за ценные советы и критические замечания в процессе выполнения данной диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность проблемы, раскрывается научная новизна полученных результатов и степень внедрения предложенных разработок и рекомендаций диссертации.

В первой главе дается анализ состояния проблемы оценки изнашивания трибосопряжений.

Обстоятельные исследования в области трения и изнашивания выполнены отечественными учеными: в условиях сухого трения для пар металл-хлопок - академиком Махкамовым Р.Г.; для пар полимер-хлопок - академиком Негматовым С. С.; для трущихся пар скольжения машин, применяемых в хлопководстве - академиком Юлдашевым Ш.У.; в условиях гидродинамического взаимодействия поверхностей трения - академиком Лебедевым О.В.; по моделированию динамики процесса изнашивания рабочих органов и приводов хлопкоуборочных машин академиком Глуценко А.Д.; по выявлению механизма трения и изнашивания композиционных полимерных материалов с хлопком и его относительной механической повреждаемости - профессором Джумабаевым А. Б.; в условиях резания - профессором Балабековым М.Т.; по повышению износостойкости режущих инструментов - профессором Аликуловым Дж. Е.; в парах металл-металл с абразивной прослойкой - профессором Икрамовым У.А.; по износостойкости пористых материалов – профессором Мошковым А.Д.; по повышению износостойкости деталей машин термической обработкой – профессором Мухамедовым А. А.; по наплавке износостойких сплавов – профессором Меликовым В.В.; по технологии восстановления деталей машин – профессором Кадыровым С. М.; по прогнозированию износостойкости машин на стадии

проектирования – профессором Махкамовым К. Х.; по системному подходу в трибологии – профессором Левитиным М.А.; по повышению износостойкости тяжело нагруженных зубчатых передач – Иргашевым А.; по повышению износостойкости рабочих органов землеройных машин – д.т.н. Шукуровым Р. У.; по моделированию динамики процесса изнашивания при взаимодействии колеса с рельсом – д.т.н. Файзибаевым Ш.С. Эти исследования являются закономерным продолжением развития науки о трибологии видных зарубежных ученых: Айнбиндера С.Б., Арчарда Д.Ф., Белого В.А., Буше Н.А., Гаркунова Д.Н., Кащеева В.Н., Клейса И.Р., Костецкого Б.И., Крагельского И.В., Кузнецова В.Д., Погодаева Л.И., Сорокина Г.М., Тенебаума М.М., Федорова В.В., Федорова С.В., Хрущева М.М., Чичинадзе А.В. и др.

Показано, что в настоящее время в изучении трения и изнашивания наметилось три направления: механо-математическое, металлофизическое и термодинамическое (энергетическое и энтропийное). Основное внимание в работе уделено анализу термодинамических критериев оценки изнашивания.

Специфические условия работы материала пары трения, связанные с многократным взаимодействием материала на дискретных пятнах контакта при тангенциальных перемещениях, сопровождается затратами механической энергии и превращением ее в другие виды энергии. При этом проявляются процессы самоорганизации, которые подчиняются законам термодинамики необратимых процессов, и выражаются в том, что материал поверхности трения «внутренне сопротивляется» изнашиванию и соответственно приспособляется таким образом, чтобы снизить энергетические затраты и износ.

В связи с этим в последнее время отечественными и зарубежными учеными интенсивно развивается термодинамический (энергетический и энтропийный) подход к описанию процессов разрушения при трении. Это направление представляет определенный интерес с точки зрения возможности анализа процессов разрушения поверхностных слоев трущихся материалов с позиций фундаментальных законов термодинамики, теории дислокаций и молекулярно - кинетических представлений о прочности и разрушении твердых тел. Этот подход является одним из возможных путей получения математического описания процессов разрушения и прогнозирования износостойкости материалов и деталей узлов трения.

Исследований по определению энергетического баланса при трении выполнено немного: (Кузнецовым В. Д. с Бессоновым Н. А. , Костецким Б. И. с Линником Ю. И. и Гецевичем Э. Г.). К сожалению, в этих исследованиях энергетический баланс процесса трения был просто «сфотографирован», и авторы количественно не увязали его с закономерностями изнашивания материалов.

Анализ энергетических критериев, предложенных различными авторами для оценки изнашивания, показал, что чаще всего в качестве такового принимают работу, затраченную на образование единицы массы или (объема) продуктов износа, хотя называют его по-разному: удельная работа износа, мнимая плотность энергии трения, специфическая энергия царапания и др. Однако, как считают Давиденков Н.Н. и Хрущов М. М., нельзя отождествлять работу трения с работой разрушения, т. к. работа разрушения составляет очень малую долю работы трения и поэтому, за редким исключением, между ними не может быть количественной зависимости.

Анализ литературных источников также показал, что исследования фрикционного взаимодействия с использованием энтропийных представлений носят в основном теоретический характер. Прямые экспериментальные исследования энтропийного баланса процесса трения и изнашивания в литературе отсутствуют. Предлагаемые энтропийные критерии разрушения металлических материалов при трении не получили достаточного экспериментального обоснования и являются спорными.

Мало уделяется внимания кинетике изменений, происходящих в поверхностных слоях пары трения. Термодинамический и кинетический подходы к изучению процессов трения и изнашивания используются обособленно, в отрыве друг от друга. Их синтез и применение чрезвычайно важны и перспективны, в особенности при изучении процессов самоорганизации при трении с позиций синергетики.

На основе анализа литературных источников сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена теоретическому анализу процесса изнашивания материала при внешнем трении с использованием термодинамического подхода, (включающего энергетические, энтропийные и кинетические представления), в основу которого положены:

- законы классической и неравновесной термодинамики;
- дислокационные представления о процессе пластической деформации и разрушении твердых тел;
- физические представления о пластической деформации как конкуренции двух взаимосвязанных и противоположных процессов: упрочнения и разупрочнения;
- термодинамическая теория прочности, предложенная профессором В. В. Федоровым;
- кинетические представления о прочности и разрушении твердых тел.

Вопрос расчетно-аналитической оценки изнашивания материалов при внешнем трении является частью общей проблемы прочности и разрушения твердого тела.

По современным молекулярно-кинетическим представлениям разрушение реальных материалов является процессом, развивающимся во

времени независимо от природы материала и характера его нагружения. При этом окончательному разрушению предшествует постоянное накопление в материале очагов разрушений – элементарных дефектов и повреждений (субмикроскопических нарушений сплошности). Долгое время считалось, что вся механическая энергия превращается в тепло. Однако сейчас считается установленным, что часть ее задерживается в материале в виде скрытой энергии деформаций, затрачиваемой на образование дефектов кристаллической решетки. По мере развития процесса деформирования количество дефектов увеличивается, они развиваются в микро- и макротрещины и приводят к разрушению материала.

Процесс изнашивания материалов при внешнем трении обычно рассматривают как процесс пластической деформации и разрушения, характеризующийся локализацией в поверхностных слоях материала пары трения. Этот процесс осуществляется в условиях сложного, неоднородного и переменного во времени напряженно-деформированного состояния приповерхностных слоев материала.

Рассматривая процесс изнашивания материалов как частный случай пластической деформации и разрушения, обусловленный конкуренцией двух одновременно протекающих и взаимосвязанных процессов: упрочнения и разупрочнения, термодинамические представления о прочности и разрушении распространены нами на процессы изнашивания при внешнем трении.

Необратимо поглощаемую энергию деформаций поверхностных слоев материала пары трения можно разделить на две части (рис.1).

Первая сравнительно небольшая часть (до 30%) обусловлена накоплением в деформируемых объемах материала и продуктах износа скрытой энергии ΔU_c , которая связана с зарождением и задержкой в деформируемых объемах различного рода дефектов (дислокаций, вакансий и др.) и повреждений (субмикроскопических нарушений сплошности) и их развитием в микро- и макротрещины критического размера. Скрытая энергия ΔU_c характеризует упрочненное состояние материала.

Многочисленные исследования показывают, что в процессе трения поверхностные слои упрочняются (наклепываются) до предела и, когда исчерпывается способность материала к пластической деформации, появляются трещины, которые, разрастаясь, смыкаются и образуют частицы износа, т.е. скрытая энергия ΔU_c является мерой повреждаемости материала и ответственна в основном за разрушение.

Вторая значительная (до 70%) часть работы трения вследствие колебательного движения и процессов возврата (уничтожения) дефектов и повреждений необратимо трансформируется в тепло Q , т. е. связана с

тепловым эффектом трения. Тепловая энергия характеризует разупрочненное состояние материала. Часть этой энергии Q_T рассеивается в окружающую среду за счет теплообмена. Другая часть ΔU_T , повышая температуру деформируемых объемов материала и продуктов износа, обуславливает ослабление сил межатомных связей, следовательно, также как и скрытая энергия деформаций, является мерой повреждаемости материала.

Энергетическая модель процесса трения и изнашивания

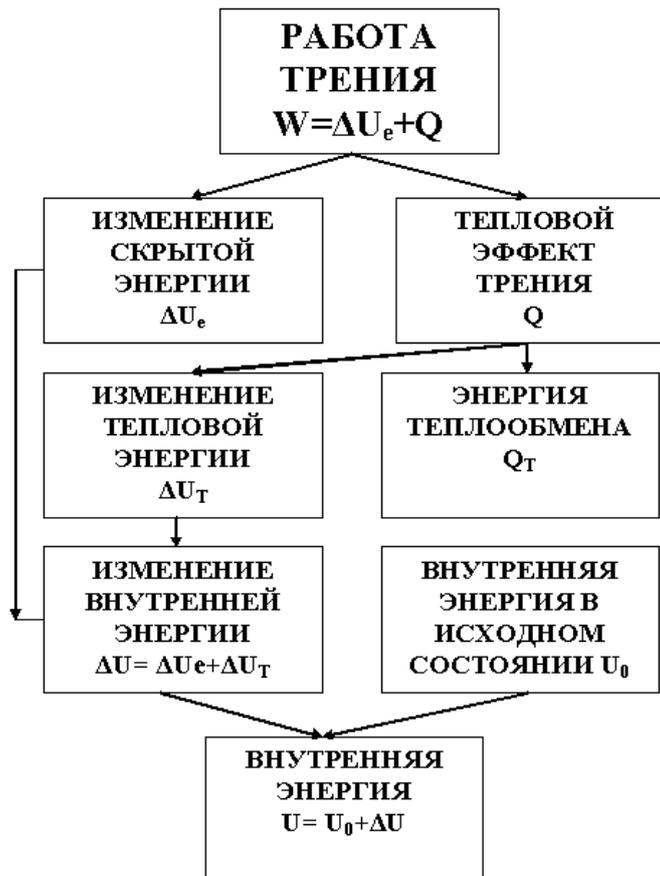


Рис.1

Как скрытая энергия ΔU_e , так и тепло внутреннего теплообмена ΔU_T (будем называть ΔU_T тепловой составляющей внутренней энергии), изменяют внутреннюю энергию деформируемых объемов материала ΔU .

В соответствии с I законом термодинамики процесс деформирования поверхностных слоев материала пары трения можно представить соотношением:

$$W = Q + \Delta U_e, \quad (1)$$

где W - работа трения; Q - тепловой эффект трения;
 ΔU_e - изменение скрытой энергии тела.

Согласно термодинамической теории прочности, предложенной Федоровым В. В., за критерий прочности принимается плотность накапливаемой в деформируемых объемах материала внутренней энергии, критическое значение которой u^* не зависит от условий деформирования и является физической константой материала

$$u(r,t) = u(r,0) + \Delta u(r,t) \leq u^* = const, \quad (2)$$

где $u(r,t)$ - плотность внутренней энергии в локальных объемах материала в момент времени деформирования t ; $u(r,0)$ - исходная плотность внутренней энергии в локальных объемах материала ($t = 0$), характеризующая наследственные свойства материала, предысторию его нагружения; $\Delta u(r,t)$ - изменение плотности внутренней энергии в локальных объемах материала за время деформирования t ; r - параметр, характеризующий, координаты локальных объемов материала.

По существу, термодинамический критерий совпадает с критерием разрушения, рассматриваемым в теории дислокаций, когда за критерий разрушения принимается плотность (количество) дефектов. При энергетическом подходе за критерий разрушения принимается плотность энергии этих дефектов (плотность внутренней энергии). Более того, энергетический критерий учитывает еще и термическое разупрочнение материала за счет процесса саморазогрева.

Интерпретируя процесс трения и изнашивания с позиций энергетического подхода, нами получена формула для оценки скорости объемного изнашивания о закрепленные абразивные частицы при стационарных условиях трения, не осложненных химическим взаимодействием с окружающей средой

$$\dot{v}_u = \frac{\delta f P V}{u^* \Delta u_0 - \Delta u_T}, \quad (3)$$

где \dot{v}_u - скорость объемного изнашивания; δ - относительная величина скрытой энергии деформаций; f - коэффициент трения; P - нормальная нагрузка; V - скорость скольжения; u^* - критическая плотность внутренней энергии; Δu_0 - плотность внутренней энергии в исходном состоянии; Δu_T - плотность тепловой составляющей внутренней энергии.

Показано, что из полученного выражения (3) при определенных условиях вытекают известные зависимости В. Д. Кузнецова и М. М. Хрущева, выведенные ими по результатам экспериментальных исследований частного характера. Рассмотрены гипотезы энергетического подобия механического и термического разрушения материалов, предложенные различными авторами.

Рассматривая процессы трения и изнашивания с позиций термодинамики необратимых процессов, следует отметить, что пара трения типичный пример открытой термодинамической системы, которая

обменивается теплом (тепловой эффект трения) и веществом (продукты износа, физико-химическое взаимодействие среды) с окружающей средой. Для таких систем полное приращение энтропии системы dS распадается на производство энтропии d_iS , вызываемое изменениями внутри системы, и поток энтропии d_eS , возникающий за счет взаимодействия с внешней средой, (рис.2) который включает обмен теплом $d_{eq}S$, веществом (продуктами износа) $d_{ev}S$ и химическое взаимодействие с окружающей средой $d_{e\mu}S$

$$dS = d_iS + d_eS = d_iS + d_{eq}S + d_{ev}S + d_{e\mu}S \quad (4)$$

Энтропийная модель процесса трения и изнашивания

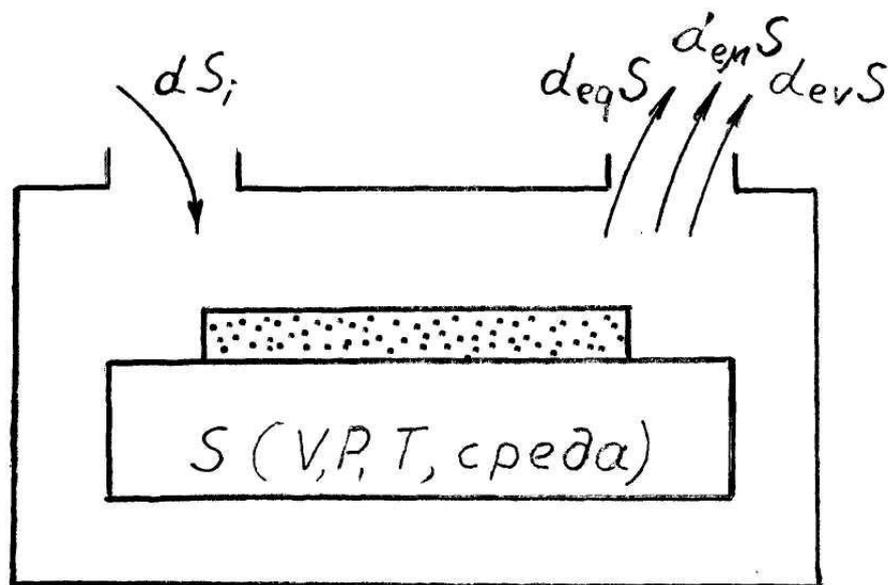


Рис. 2

При трении в деформируемых поверхностных слоях материала образуются дефекты кристаллического строения, которые искажают кристаллическую решетку, вызывая разупорядоченность в структуре металлических сплавов. Мерой хаоса, беспорядка в природе, как известно, является энтропия. Поэтому процесс пластической деформации и разрушения при изнашивании можно оценить изменением энтропии.

В качестве критерия для оценки износостойкости материала нами предлагается критический уровень (плотность) энтропии s_* , значение которого для определенного материала является величиной, зависящей только от его физико-химической природы

$$s(t) = s_{ok} + s_{ov} + \Delta s_{ip} \leq s_* = const, \quad (5)$$

где $s(t)$ - плотность энтропии материала в момент времени t ; s_{ok} - начальная плотность конфигурационной энтропии, связанной с дефектами исходной структуры материала; s_{ov} - начальная плотность вибрационной энтропии, связанной с температурой окружающей среды; Δs_{ip} - приращение плотности энтропии к моменту времени t ; s^* - критическая плотность энтропии материала.

Критическая плотность энтропии s^* представляет из себя энтропию, которая накапливается в единице объема материала к моменту разрушения, т. е. характеризует критическую разупорядоченность в структуре материала поверхности трения.

Получена аналитическая зависимость для оценки изнашивания при стационарных условиях абразивного изнашивания

$$V_u = \frac{\delta f P V}{T_f (s^* - s_{ov} - s_{ok})}, \quad (6)$$

где T_f - температура на поверхности трения.

Условие прочности (5) и аналитическое уравнение (6) для оценки абразивного изнашивания при установившемся режиме трения, полученные с помощью энтропийного подхода, отличаются от соответствующих зависимостей, полученных при энергетическом подходе (2) и (3), когда за критерий изнашивания принимается внутренняя энергия материала u^* , на величину множителя $1/T_f$.

С позиций макроскопических, развиваемых в работах И.В. Крагельского, Н. М. Михина, Н. Б. Демкина, износ - усталостный процесс, т. к. разрушение поверхности трения происходит в результате многих актов деформации на фактических пятнах контакта. С позиций микроскопических, согласно молекулярно - кинетическим представлениям, развиваемым в работах Журкова С. Н., Ратнер С. Б., Бартьева Г. М., Федорова В. В., износ - это разрыв химических связей за счет флуктуаций при многих актах теплового движения.

На основе синтеза энтропийного и кинетического подходов к проблеме изнашивания получена аналитическая зависимость для оценки изнашивания трибосопряжений в условиях трения, не осложненных химическим взаимодействием с окружающей средой

$$\frac{P V f}{T_f} = \frac{2 k N_D}{h} U_i^{\text{II}} (\sigma_0 T_f) \exp - \frac{U_i^{\text{II}} (\sigma_0 T_f)}{k T_f} \text{sh} \frac{\alpha \sigma_i^2 + u_e^0}{2 k T_f} + s^* \cdot V_n, \quad (7)$$

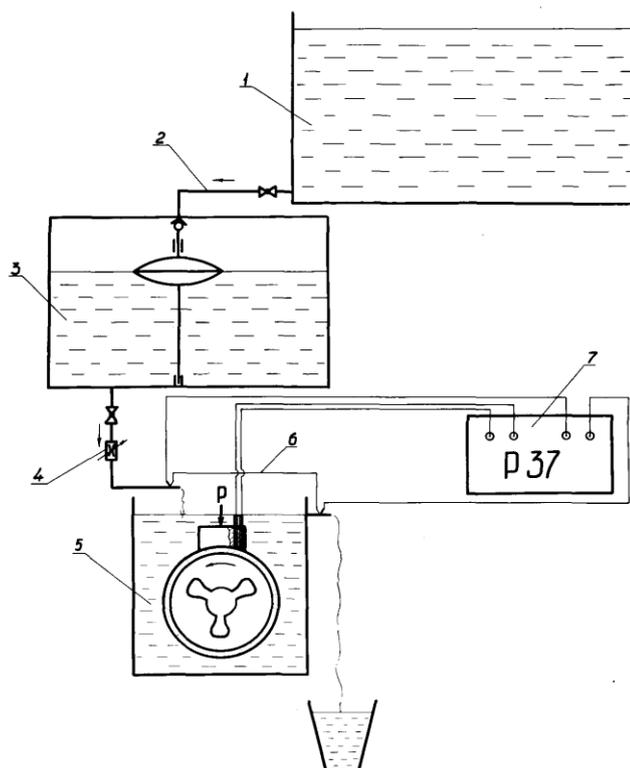
где k - постоянная Больцмана; h - постоянная Планка; u_e^0 - плотность скрытой энергии элементарного объема; σ_0 - шаровая часть тензора напряжений; σ_i - интенсивность напряжений; U_i^{II} - энергия активации диффузии дефектов; N_D - количество атомов, испытывающих деформацию.

Учитывая, что задача о напряженном состоянии на контакте при качении цилиндра по плоскости решена Савериным М. М., в условиях упругого контакта при скольжении и качении – Непомнящим Е. Ф., в условиях пластического контакта – Харачем Г. М., при больших значениях коэффициента трения - Кузнецовым Е. А., для условий перекачивания колеса по рельсу - Шахунянцем Г. М., зависимость (7) может быть использована для расчета трибосопряжений. В данной работе эта задача решена для расчета износа рельса.

В третьей главе описаны методика, экспериментальная установка, и программа экспериментальных исследований энергетического и энтропийного баланса процесса трения металлических материалов при изнашивании о закрепленные абразивные частицы.

Разработанная методика предусматривает возможность экспериментального изучения закономерностей изнашивания материалов, а также закономерностей изменения составляющих энергетического и энтропийного балансов процесса абразивного изнашивания при стационарном режиме работы трибосопряжения.

Схема устройства для замера теплового эффекта трения



1 – бак, 2 – трубопровод, 3 – поплавковая камера, 4- калиброванное отверстие, 5 – ванночка – калориметр, 6 – термопара, 7 – потенциометр.

Рис. 3

Экспериментально определялись мощность трения \dot{W} и мощность теплового эффекта трения \dot{Q} . Скорость изменения скрытой энергии деформаций \dot{U}_e определялась прямым (одноступенчатым) методом, основанном на непосредственном применении I закона термодинамики (1).

Для проведения экспериментальных исследований была разработана и изготовлена специальная установка на базе головки машины трения МТ62М, позволяющая с высокой точностью производить замеры момента трения и линейного износа. С целью повышения точности замера момента трения, предпринята модернизация головки трения МТ62М и предусмотрена тарировка устройства для замера момента трения. При доверительной вероятности 0,95 ошибка в замере момента трения составила 0,42%.

Основная схема узла трения — вал-вкладыш. В качестве контр тела использован алмазный круг.

Для определения мощности теплового эффекта трения использован принцип проточного калориметра. Головка машины трения (рис.3) оборудовалась ванночкой 5, через которую осуществлялся проток масла с постоянным расходом G .

Во входном и выходном штуцерах, которыми ванночка 5 подключалась к маслопроводу 2, устанавливалась 5-ти спайная дифференциальная термопара 6. Замер термо-ЭДС, определяющей перепад значений температур масла на входе и выходе из ванночка 5, осуществлялся потенциометром 7 типа Р37.

С целью получения большей точности устройство замеров тепловых потоков подвергалось тарированию при помощи специального нагревателя. Обработкой тарировочных данных методом наименьших квадратов получали зависимость $Q = \varphi(G, \Delta T)$ при различных скоростях вращения вала. Мощность теплового эффекта определялась по произведению $(G \Delta T)$, замеренному в процессе экспериментальных исследований и по зависимости $Q = \varphi(G, \Delta T)$, полученной при тарировании. Точность измерения мощности теплового эффекта Q при доверительной вероятности 0,95 составила 0,3%.

Точность измерения линейного износа составила $\pm 3-5$ мкм.

Замер температуры поверхности трения осуществлялся методом разомкнутой термопары. Точность измерения температуры — $\pm 2^0$ С.

Для проведения исследований были выбраны металлические сплавы (стали У8А, 40Х, серый чугун СЧ 18 и бронза ОЦС 3-12-5) в отожженном состоянии, характеризующиеся различным химическим составом, физически и механическими свойствами.

Для каждого из материалов замеры производились при пяти различных значениях удельных нагрузок при постоянной скорости сколь-

жения. Затем устанавливалась следующая ступень скорости скольжения и производились замеры при тех же самых значениях удельных нагрузок.

Значения удельных нагрузок изменялись:

- для сталей 40X и У8А..... $(8,163 - 13,61) \cdot 10^5$, Па;
- для чугуна СЧ 18 $(6,8 - 13,61) \cdot 10^5$, Па;
- для бронзы ОЦС 3-12-5..... $(2,14 - 8,44) \cdot 10^5$, Па.

Ступени скоростей скольжения имели следующие значения:

- для сталей 40X, У8А, чугуна: 0,84; 1,03; 1,33; 1,65; 2,04 м/с;
- для бронзы ОЦС 3 -12-5 : 0,69; 0,84; 1,03; 1,33 м/с.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований энергетического и энтропийного балансов и их обсуждение.

Экспериментальные данные комплексных исследований закономерностей абразивного изнашивания и составляющих энергетического и энтропийного балансов процесса трения позволили провести анализ взаимной связи износа с термодинамическими характеристиками процесса внешнего трения. С этой целью рассчитаны и сопоставлены абсолютные, относительные (отнесенные к работе трения) и удельные (отнесенные к объему продуктов износа) величины энергетического и энтропийного балансов процесса абразивного изнашивания, предельных критических значений плотности внутренней энергии и плотности энтропии изнашиваемого материала.

Зависимость составляющих энергетического баланса процесса абразивного изнашивания от удельной нагрузки p при постоянной скорости $V = 0.84$ м/с (сталь 40X)

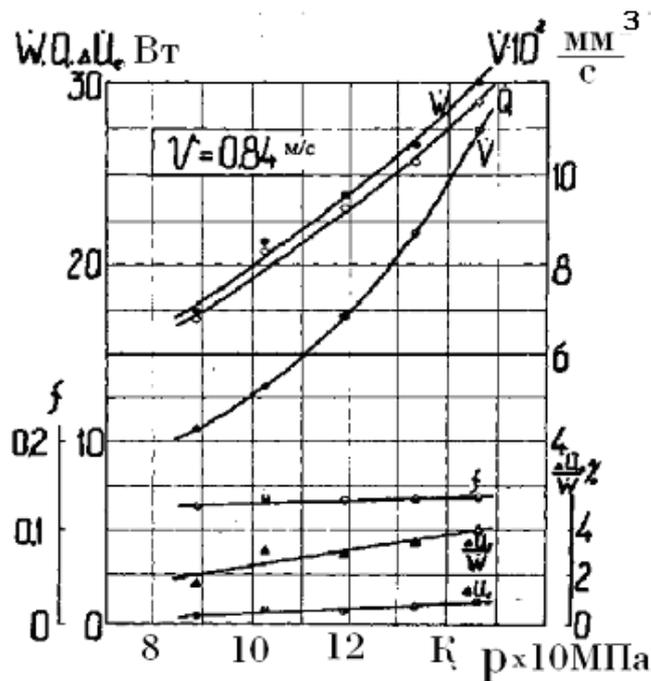


Рис.4

Установлено, что абсолютная величина работы трения W , а также соотношения между основными ее составляющими: количеством выделившегося тепла Q и количеством скрытой энергии деформаций ΔU_e зависит не только от физико-химической природы материала, но и от условий трения.

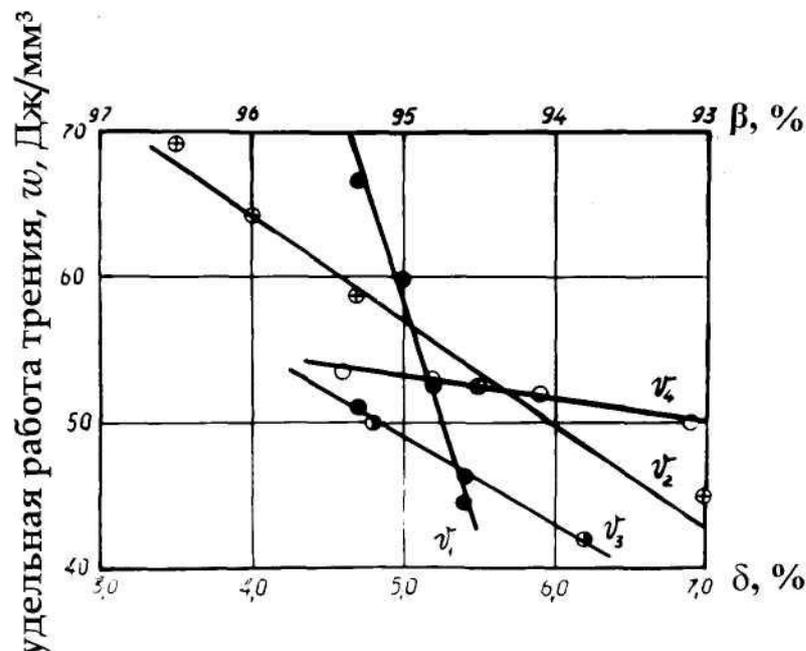
В работе проведены корреляционный и регрессионный анализы экспериментальных данных и выявлены закономерности изменения мощности трения, мощности теплового эффекта трения, скорости скрытой энергии и скорости объемного изнашивания исследованных материалов от удельной нагрузки и скорости скольжения.

Экспериментальные исследования показали, что температура на поверхности трения изменяется незначительно и не превышает $T_f < 343^{\circ} \text{K}$.

Относительная величина теплового эффекта трения $\beta = \frac{Q}{W}$, показывает

какая часть от общей работы трения превращается в тепло. Ее величина составила 94 – 98,5 % от работы трения W , т. е. значительная часть работы трения превращается в тепло Q и рассеивается в окружающую среду за счет теплообмена (рис. 5).

Зависимость удельной работы трения w от относительных величин теплового эффекта трения β и скрытой энергии δ (бронза ОЦС 3-12-5)



при скоростях скольжения:

$$V_1 = 0,69 \text{ м/с}; V_2 = 0,84 \text{ м/с}; V_3 = 1,03 \text{ м/с}; V_4 = 1,33 \text{ м/с}.$$

Рис. 5

Относительная величина скрытой энергии $\delta = \frac{\Delta U_e}{W}$ характеризует

степень упрочнения (наклепа) поверхностных слоев материала и продуктов износа и показывает какая часть работы трения аккумулируется в деформированных объемах пары трения в виде различных дефектов и повреждений. Исследования показали, что относительная величина скрытой энергии деформаций δ составляет незначительную часть от работы трения и колеблется в пределах от 1,5 - 7 % в зависимости от материала образца и условий трения.

Соотношение между величинами δ и β определяется конкуренцией двух одновременно протекающих и противоположных процессов: упрочнения и разупрочнения (рис. 5).

Зависимость удельных и относительных значений энергетических характеристик процесса абразивного изнашивания стали 40Х от условий трения (удельной нагрузки p и скорости скольжения V)

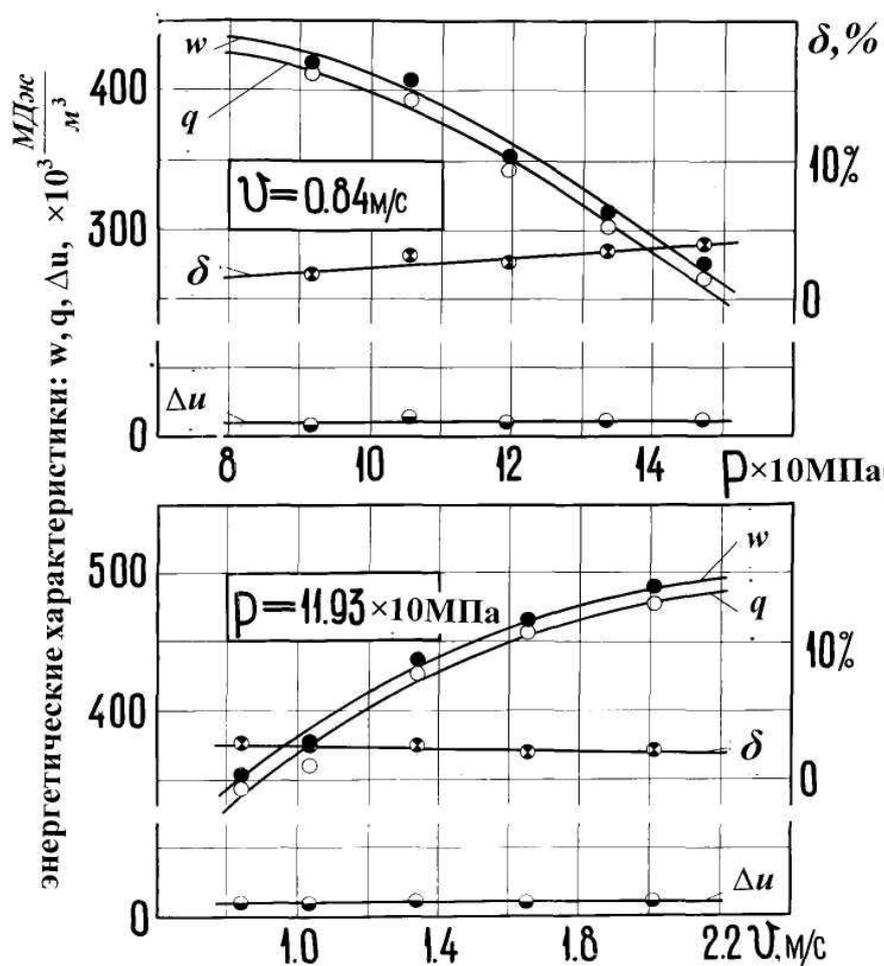


Рис. 6

$$\text{Удельная величина (плотность) работы трения } w = \frac{W}{V_{\text{и}}} = \frac{\dot{W}}{\dot{V}_{\text{и}}},$$

характеризующая количество работы, которое необходимо затратить на разрушение единицы объема материала. Это мера работоспособности материала. Чем больше удельная работа трения, тем больше необходимо затратить работы на разрушение единицы объема материала, тем выше его износостойкость и наоборот.

Анализ взаимной связи скорости изнашивания и удельной работы трения, показал, что в общем случае однозначной зависимости между указанными характеристиками процесса трения и износа не существует и поэтому однозначной количественной связи между ними быть не может.

Величина плотности работы трения, изменяясь в широких пределах в зависимости от условий трения (удельной нагрузки и скорости скольжения), сама является функцией процесса изнашивания. Следовательно, плотность работы трения не может быть принята в качестве критерия разрушения материала при трении, как это предлагается рядом авторов (рис.6).

Интересно отметить, что абсолютные значения плотности работы трения w в несколько раз превышают значения энергии необходимой для расплавления единицы объема изношенного материала, т. е. для износа некоторого объема материала необходимо затратить энергии в 10-50 раз больше, чем ее необходимо для расплавления этого объема. Это свидетельствует о том, что не вся работа трения идет на разрушение материала, а только небольшая доля от общей работы трения.

$$\text{Удельная величина (плотность) теплового эффекта трения } q = \frac{Q_{\text{т}}}{V_{\text{и}}}$$

характеризует количество выделившегося в процессе трения тепла, приходящееся на единицу объема изношенного материала, и служит мерой термического разупрочнения материала.

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что все рассмотренные выше абсолютные (W , Q , ΔU_e), относительные (β , δ) и удельные (w , q) характеристики процесса абразивного изнашивания зависят не только от физико-химической природы материала, но и в значительной степени от условий (удельной нагрузки p , скорости скольжения V), при которых протекает процесс трения, т. е. они сами являются функциями процесса изнашивания. Поэтому они не могут быть приняты в качестве критерия для оценки изнашивания (рис.4 - 6).

Экспериментальные исследования показали, что только величина плотности внутренней энергии Δu не изменяется при изменении условий изнашивания.

Удельная величина (плотность) внутренней энергии материала $\Delta u = \frac{\Delta U}{V_{и}}$

характеризует энергоемкость материала, т. е. его способность накапливать в своих объемах энергию до момента разрушения. Обработка экспериментальных данных методом наименьших квадратов и их анализ показали, что для конкретного материала, удельная величина (плотность) внутренней энергии, накапливаемой к моменту разрушения, есть величина постоянная, не зависящая от условий трения (рис.7). Постоянство плотности внутренней энергии, накапливаемой в деформируемых объемах пары трения, свидетельствует о том, что разрушение (износ) происходит тогда, когда уровень внутренней энергии в этих объемах достигает предельной (критической) величины u^* .

Зависимость плотности внутренней энергии Δu от мощности трения \dot{w}

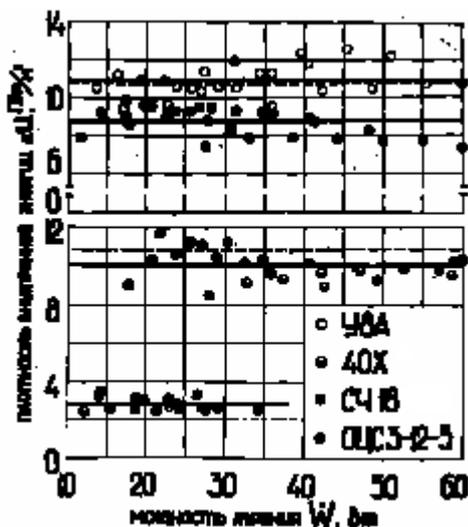


Рис. 7

Сопоставление величины критической плотности внутренней энергии u^* с теплофизическими свойствами исследованных материалов показало, что она хорошо коррелирует с энтальпией плавления материала в жидком состоянии Δh_s (табл.1). Это согласуется со структурно-энергетической теорией разрушения, основанной на гипотезе энергетического подобия процессов механического разрушения и плавления металлов, которая развивается в работах В.С. Ивановой.

Аналитические зависимости для оценки абразивного изнашивания, полученные с помощью энтропийного подхода, отличаются от соответствующих зависимостей, полученных при энергетическом подходе, когда за критерий изнашивания принимается внутренняя энергия

материала u^* , на величину постоянного множителя $1/T_f$. В связи с тем, что в условиях проведенного эксперимента температура на поверхности трения изменялась незначительно (от 310 – 343 °К), закономерности изменения соответствующих термодинамических характеристик энергетического и энтропийного балансов аналогичны.

Таблица 1

Термодинамические характеристики процесса абразивного изнашивания отожженных материалов.

| Материал | Термодинамические характеристики | | | | |
|----------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--|--|-----------------|
| | u^* , МДж/м ³ | ΔH_s , МДж/м ³ | S^* , $\frac{\text{МДж}}{^\circ\text{К м}^3}$ | ΔS_{TS} , $\frac{\text{МДж}}{^\circ\text{К м}^3}$ | δ , % |
| Сталь 40Х | 9,61 | 10,5 | 0,0344 | 0,0138 | 1,5-3,9 |
| Сталь У8А | 10,82 | 10,5 | 0,375 | 0,0138 | 1,7-2,6 |
| Чугун СЧ 18 | 8,82 | 9,7 | 0,0314 | 0,0138 | 1,9-5,6 |
| Бронза ОЦС 3-12-5 | 2,71 | 5,85 | 0,0116 | 0,0137 | 3,5-7,0 |

Производство энтропии $dS_i = \frac{\dot{W}}{T_f}$ характеризует поток дефектов кристаллического строения, который образуется в результате пластической деформации поверхностных слоев при трении.

Поскольку результаты экспериментальных исследований получены в условиях установившегося режима абразивного изнашивания, то производство энтропии $d_i S$ равно потоку энтропии $d_e S$. Поэтому закономерности их изменения от удельной нагрузки p и скорости скольжения V одинаковы и аналогичны закономерностям изменения мощности трения \dot{W} (рис.4).

Поток энтропии, связанный с обменом трибосистемы теплом с

окружающей средой $d_{eq} S = \frac{\dot{Q}_T}{T_f}$ характеризует количество энтропии, которое термодинамическая система отдает окружающей среде, обмениваясь с ней теплом. Как показали экспериментальные исследования, большая часть дефектов за счет процессов разупрочнения уничтожаются (аннигилируют), их энергия превращается в тепло и покидает трибосистему. Эта составляющая энтропийного баланса не

вызывает необратимых изменений внутри трибосистемы. Следовательно, она не оказывает влияния на процесс изнашивания.

Закономерности изменения потока энтропии $d_{eq}S$ аналогичны изменениям теплового эффекта трения \dot{Q} (рис.4).

Производство конфигурационной энтропии $d_{ik}S = \frac{\Delta U_e}{T_f}$ характеризует изменение энтропии внутри системы, вызванное разупорядоченностью структуры материала в результате пластической деформации (образование вакансий, дислокаций, дисклинаций и других дефектов кристаллического строения.) Экспериментальные исследования показали, что производство конфигурационной энтропии составляет небольшую часть от производства энтропии системы (1,5 – 7,0 %). Эта составляющая энтропийного баланса вызывает необратимые изменения в трибосистеме и является ответственной за процесс разрушения поверхностных слоев пары трения. Закономерности изменения конфигурационной энтропии аналогичны изменениям скрытой энергии деформаций $\Delta \dot{U}_e$ (рис. 4).

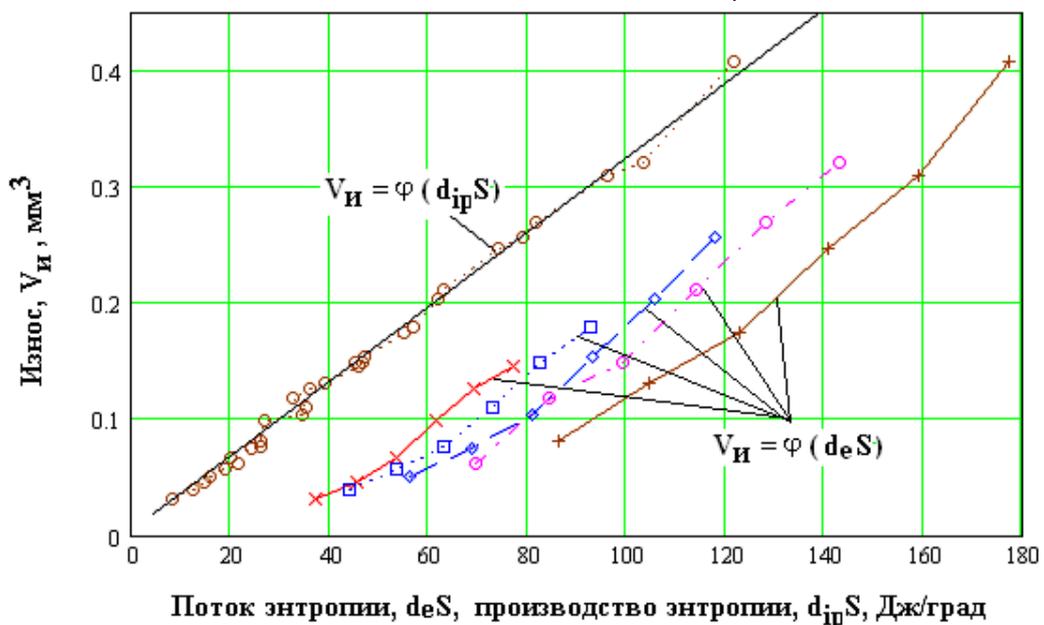
Производство вибрационной энтропии $d_{ie}S = \frac{\Delta U_T}{T_f}$ характеризует изменение энтропии внутри системы, связанное с колебательным движением атомов и также, как конфигурационная энтропия, является ответственной за процесс разрушения поверхностных слоев пары трения. Закономерности изменения вибрационной энтропии аналогичны изменениям тепловой составляющей внутренней энергии $\Delta \dot{U}_T$. Величина $d_{ie}S$ для принятых условий трения пренебрежимо мала и принималось $d_{ie}S = 0$.

Производство энтропии, связанное с необратимыми изменениями внутри трибосистемы $d_{ip}S = d_{ie}S + d_{ik}S$ характеризует суммарное изменение энтропии в деформируемых поверхностных слоях за счет конфигурационной $d_{ik}S$ и вибрационной $d_{ie}S$ составляющих и является количественным выражением необратимых изменений внутри системы. Эта характеристика, являясь мерой разупорядоченности структуры материала поверхности трения, ответственна за процесс разрушения. Экспериментальные исследования показали, что изменение энтропии $d_{ip}S$ составляют небольшую часть от производства энтропии d_iS . Закономерности изменения производства энтропии внутри системы $d_{ip}S$ аналогичны изменениям внутренней энергии ΔU . (рис. 4)

Удельная величина (плотность) производства энтропии $s_i = \frac{d_i S}{V_{\text{н}}} = \frac{1}{T_f} \frac{W}{V_{\text{н}}}$

характеризует количество энтропии, которое необходимо воспроизвести при определенных условиях трения для образования единицы объема продуктов изнашивания. Закономерности изменения плотности производства энтропии s_i аналогичны изменениям плотности мощности (работы) трения w . Эта характеристика процесса зависит не только от физико-химической природы материала, но и в значительной степени от условий (удельной нагрузки p , скорости скольжения V), при которых протекает процесс трения.

Зависимость износа $V_{\text{и}}$ чугуна СЧ 18 от потока энтропии $d_e S$ и производства энтропии $d_{ip} S$



при скоростях скольжения:

(\times - $V_1 = 0,84$; \square - $V_2 = 1,03$; \diamond - $V_3 = 1,33$; \circ - $V_4 = 1,65$; $+$ - $V_5 = 2,04$, м/с)

Рис. 8

Анализ взаимной связи скорости изнашивания $\dot{V}_{\text{и}}$ и плотности производства энтропии s_i показал, что в общем случае однозначной зависимости между указанными характеристиками процесса трения и износа не существует и поэтому однозначной количественной связи между ними быть не может. Величины плотности производства энтропии s_i , соответственно и плотности потока энтропии s_e , (т. к. при установившемся режиме изнашивания $d_i S = d_e S$) изменяются в широких пределах в зависимости от условий трения (удельной нагрузки и скорости скольжения), т.е. сами являются функцией процесса изнашивания (рис.8). Следователь-

но, они не могут быть приняты в качестве критерия разрушения материала при трении.

Удельная величина (плотность) потока энтропии, связанная с обменом трибологической системы теплом Q_T с окружающей средой

$s_{eq} = \frac{d_{eq} S}{V_u} = \frac{1}{T_f} \frac{Q_T}{V_u}$ характеризует поток энтропии системы, приходящийся на единицу продуктов изнашивания. Анализ экспериментальных данных показывает, что зависимость плотности потока энтропии s_{eq} от удельных давлений и скоростей скольжения аналогична зависимостям плотности производства энтропии s_i .

Проведенный анализ результатов экспериментальных исследований показал, что все рассмотренные выше энтропийные характеристики ($d_i S$, $d_e S$, $d_{ip} S$, $d_{is} S$, $d_{ik} S$, s_i , s_{eq}) процесса абразивного изнашивания зависят не только от физико-химической природы материала, но и в значительной степени от условий (удельной нагрузки p , скорости скольжения V), при которых протекает процесс трения, т. е. они сами являются функциями процесса изнашивания (рис.8). Поэтому они не могут быть приняты в качестве критерия для оценки изнашивания. Экспериментальные исследования показали, что только величина плотности энтропии Δs не изменяется при изменении условий изнашивания.

Критическая величина плотности энтропии s^* характеризуют то предельно разупорядоченное состояние структуры материала, при котором происходит разрушение. На рис. 8 представлены экспериментальные данные, которые показывают, что между объемом продуктов изнашивания V_u и изменением энтропии в поверхностном слое материала $\Delta d_{ip} S$ существует прямая пропорциональная зависимость

$$V_u = k \Delta d_{ip} S, \quad \frac{1}{k} = \frac{\Delta d_{ip} S}{V_u} = \text{const} = \Delta s, \quad (6)$$

где k - коэффициент пропорциональности, зависящий от физико-химической природы материала, Δs - изменение плотности энтропии в поверхностном слое материала.

Постоянство плотности энтропии в деформируемых объемах пары трения, свидетельствует о том, что разрушение (износ) происходит тогда, когда уровень плотности энтропии в этих объемах достигает предельной (критической) величины s^* .

Критическая величина плотности энтропии определялась по формуле

$$s^* = \Delta s + s_0 = \text{const}, \quad (7)$$

где s_0 - плотность энтропии материала соответствующая стандартной плотности энтропии при $T = 298,15$ °К.

Особый теоретический и практический интерес представляет количественное сопоставление критической плотности энтропии s^* с такой термодинамической характеристикой материала как плотность энтропии плавления Δs_{TS} . Расчеты показали, что для железоуглеродистых образцов (сталь У8А, сталь 40Х, чугун СЧ 18) критическая плотность энтропии s^* в три раза больше плотности энтропии плавления Δs_{TS} , а для бронзы ОЦС 3-12-5 величины s^* и Δs_{TS} совпали (табл. 1.).

Необходимо подчеркнуть, что проведенные нами экспериментальные исследования показали, что при трении энтропийный критерий разрушения, который предлагается в работах Чудновского А. И. и Киялбаева Д. А., во-первых, не является физической константой

материала, как считают авторы, т. к. величина $\int_0^{t^*} \frac{w(t)}{T(t)} dt$ непостоянна и

изменяется с изменением режимов трения.

Во-вторых, абсолютные значения этого выражения в несколько раз превышают величину энтропии материала при температуре плавления, а не равны ей, как предполагают авторы.

По аналогичной причине энтропийный критерий деградации s^* ,

предлагаемый Бершадским Л. И. $\int_0^{t^*} \sum \frac{\omega_i(t, G)}{G_i(t)} dt$ для оценки разрушения

поверхностных слоев материала при трении, также не соответствует действительности, поскольку, как показали наши экспериментальные исследования, величина непостоянна, даже в пределах одного и того же вида изнашивания. С изменением же вида изнашивания, значения величины энергии диссипации изменяются на порядки.

Следует особо подчеркнуть, что справедливость теоретических представлений с использованием энергетического и энтропийного подходов, развиваемых в работе, подтверждена не только нашими собственными исследованиями, но и работами других авторов (Кузнецова В. Д. и Бессонова Н.А., Хрущова М.М. и Бабичева М.А., Крагельского И.В., Гецевича Э.Н., Коршунова В.Я.), экспериментальные данные которых были обработаны с рассматриваемых в работе позиций.

Следует также отметить, что хотя проведенные исследования энтропийных характеристик процесса изнашивания далеко не исчерпывают затронутой проблемы, однако уже сейчас позволяют не только объяснить ряд явлений, но также выявить причины и наметить пути к повышению износостойкости.

В частности при помощи этого подхода можно объяснить влияние асимметрии распределения теплового потока в трибосопряжении на процессы изнашивания в экспериментах Протасова Б. В., в которых при истирании бронзовой шайбы торцом стального кольца наблюдалась устойчивая прирабатываемость сопряжения и нормальное изнашивание. В такой паре ввели охлаждение бронзовой шайбы, поместив ее на холодильник с проточной водой. Естественно, температура тел трибосопряжения снизилась, и следовало бы ожидать снижения износа. Однако через короткое время наступило заедание, при этом износ бронзовой шайбы стал происходить настолько интенсивно, что посыпалась мелкая бронзовая стружка. Очевидно, снижение температуры узла трения T_f повысило производство энтропии, связанной с необратимыми изменениями в деформируемых объемах поверхности трения $d_p S = \Delta U / T_f$, что и привело к заеданию и повышенному износу пары трения.

Нельзя не отметить и перспективность энтропийного подхода. В последние годы появилось новое научное направление - синергетика. Эта наука, обязанная своим появлением современным достижениям в термодинамике необратимых процессов, в качестве инструмента для изучения явлений самоорганизации упорядоченных структур различной природы, использует кинетику энтропии. Развитие принципов синергетики даст возможность проникнуть в физическую суть процессов самоорганизации при фрикционном взаимодействии и на этой основе управлять трением и поверхностной прочностью в технике.

В заключение следует отметить, что экспериментальные исследования процесса абразивного изнашивания показали, что для принятых в данной работе условий трения, энергетические и энтропийные характеристики процесса весьма сходны между собой, а эти подходы могут рассматриваться как эквивалентные и равноценные.

Пятая глава посвящена оценке относительной износостойкости при помощи энергоемкости материала при пластической деформации.

При переходе железнодорожного транспорта на термоупрочненные рельсы проводились крупномасштабные исследования работоспособности различных закаленных рельсовых сталей. В этих исследованиях принимали участие ведущие научно-исследовательские институты и производственные объединения, а также учебные заведения железнодорожного транспорта (Центральный Научно-исследовательский Институт Министерства Путей Сообщения, УкрНИИПроект, «Азовсталь», Кузнецкий и Нижнетагильский металлургические комбинаты, Московский (МИИТ), Ленинградский (ЛИИЖТ), Новосибирский (НИИЖТ) транспортные институты и др.).

Проведенные исследования показали, что углеродистая рельсовая сталь стандартного химического состава, термически обработанная на

одинаковую твердость, но имеющая разную структуру – сорбита закалки и сорбита отпуска, имеет разные показатели износостойкости и сопротивления контактно-усталостным повреждениям. Авторы исследования объясняют это различной глубиной проникновения наклепа и различной степенью упрочнения материала головки рельса в процессе эксплуатации. Головка рельса, термообработанного на сорбит закалки, упрочняется на большую глубину ($h_{cз}=9$ мм) и большую твердость ($HV_{cз}=70$ МПа), чем головка рельса, термически обработанного на сорбит отпуска ($h_{co}=5$ мм, $HV_{co}=40$ МПа). Поэтому работоспособность рельса со структурой сорбита закалки выше, чем у рельса со структурой сорбита отпуска.

Упрочнение является результатом необратимого поглощения (аккумуляции) в головке рельса части работы деформации в виде скрытой энергии. Чем выше степень и глубина упрочнения, тем больше скрытой энергии накапливается в материале. Следовательно, можно считать, что, чем выше способность материала рельса накапливать в своих объемах скрытую энергию, или чем больше энергоемкость материала, тем лучше он будет сопротивляться изнашиванию:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \quad (8)$$

где U - скрытая энергия деформаций, Дж; ε - износостойкость.

Вывод, сделанный при исследовании работоспособности термоупрочненных рельсов, хорошо согласуется с точкой зрения Попова В. С. и Погодаева Л. И., которые связывают износостойкость со способностью материала накапливать энергию в процессе пластической деформации поверхностных объемов материала пары трения.

Зависимость накопления скрытой энергии U от работы деформации W / а / и истинная диаграмма растяжения / б /

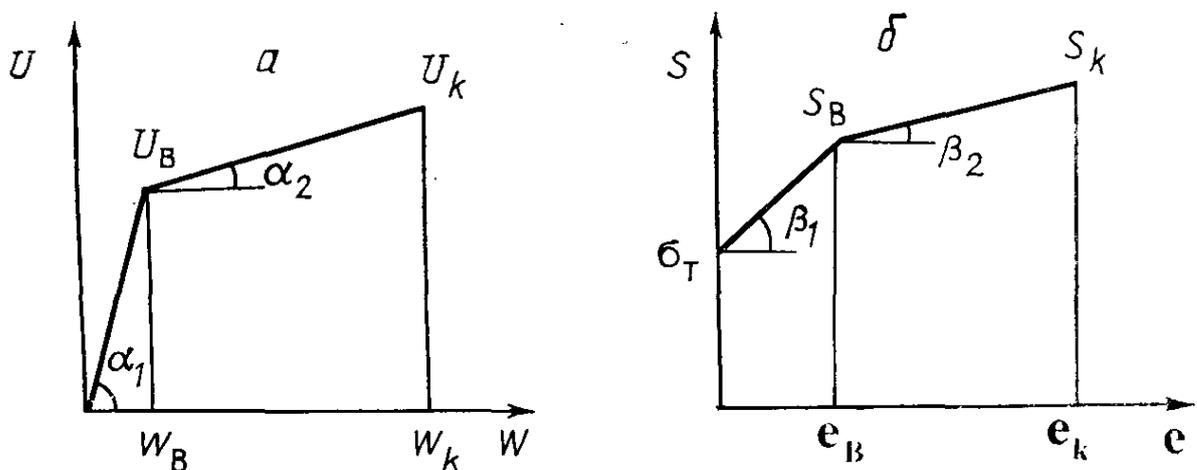


Рис. 9

Скрытая энергия, накапливаемая в деформируемых объемах поверхности трения, т. е. энергоемкость материала при пластической деформации, определена нами, исходя из аналогии кривой скрытая энергия U – работа деформации W и истинной диаграммой растяжения при одноосном нагружении $S = f(e) \equiv U = f(W)$ (рис. 9)

$$U_k = W_k D k, \quad (9)$$

где D – коэффициент деформационного упрочнения, МПа;
 k – коэффициент, (МПа)⁻¹.

Коэффициент деформационного упрочнения D , имея размерность напряжений, служит истинной мерой пластического упрочнения при растяжении.

Как известно, относительная износостойкость рельсов ε оценивается равным количеством пропущенного тоннажа в сопоставимых условиях работы, т. е. при одинаковой работе деформации $W_{K1} = W_{K2}$. Тогда из (8) и (9) имеем

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{k_1 D_1}{k_2 D_2} = \frac{\delta_{K1}}{\delta_{K2}}, \quad (10)$$

где из уравнения (9) $\delta_k = \frac{U_k}{W_k} = kD$ – относительная величина скрытой

энергии деформаций, накопленной в материале образца к моменту разрушения при испытании на растяжение.

В отличие от простого одноосного нагружения при растяжении разрушение поверхностных слоев головки рельса осуществляется в условиях сложного напряженного состояния. Если воспользоваться принятым в теории пластичности положением о единой диаграмме деформирования, то полученные зависимости для одноосного разрушения при растяжении, можно распространить на процесс разрушения в условиях сложно напряженного нагружения при перекатывании колеса по рельсу.

Относительная величина скрытой энергии деформаций, легко определяется по стандартным механическим характеристикам рельсовой стали: σ_B – пределу прочности, σ_T – пределу текучести, ψ_K – относительному сужению.

Это позволило воспользоваться экспериментальными данными лабораторных исследований и полигонных испытаний рельсов на Экспериментальном кольце МПС и в пути для проверки возможности использования предлагаемой методики для оценки работоспособности рельсов.

Анализ данных таблицы 2 показывает на сравнительно удовлетворительное соответствие расчетных величин стойкости рельсовой стали и реальной стойкости рельсов в пути.

Таблица 2

Эксплуатационные и расчетные значения стойкости различных рельсов

| Наименование рельсов | Эксплуатационная стойкость рельсов | | Расчетная стойкость рельсов |
|---|------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| | по износу | по контакт-ным повре-ждениям | |
| Стандартные сырые | 1 | 1 | 1 |
| Объемно-закаленные | 1,5-2,0 | (2,4 - 2,5)* | 2,1 –2,3 |
| Рельсы ТОВ 1, модифициро-ванные ванадием($V \approx 0,08\%$) | 2,14 ** | | 2,5 |
| Рельсы ТОВ 2, модифициро-ванные ванадием ($V \approx 0,06\%$) | 1,96** | | 2,14 |
| Рельсы, раскисленные SiCa и модифицированные FeV | - | 1,2 – 1.25 | 1,3 |
| Рельсы, модифицированные Ti | 1,5 | Меньше дефектов по рис.85 и 82. | 1,16 -1,25 |
| Хромистые ($<1\%Cr$) рельсы | 1,25-1,5 | 1,25 | 1,2-1,4 |
| Кремнистые рельсы | 1,15-1,3 | 1,2 - 1,4 | 1,1-1,3 |
| Рельсы, термически упрочненные по всей длине | 1,5-2,5 | 1,5 - 2,0 | 1,8-2,5 |
| Рельсы улучшенного металлургического качества, термически упрочненные | - | 1,7 - 2,2 | 1,8-2,5 |

* - поражаемость дефектом 11.1-2 (темные пятна и выщербины)

** - по тоннажу безотказной работы (млн. т. брутто)

Предлагаемый энергетический критерий дает возможность оценить эксплуатационную стойкость самых разных рельсовых сталей: имеющих различный химический состав и структуру, раскисленных, модифицированных, подвергнутых различным видам термической и термомеханической обработки.

Данный метод позволит заменить трудоемкие и дорогостоящие испытания рельсов расчетом на базе стандартных механических свойств рельсовой стали и сберечь материальные ресурсы на стадии выбора и создании новых более стойких материалов для изготовления железнодорожных рельсов, а также руководствоваться им для прогнозирования работоспособности рельсов, находящихся в эксплуатации.

Для государств, в которых рельсы не изготавливаются (в том числе для Республики Узбекистан), а приобретаются у стран-изготовителей,

данная методика дает возможность предварительно оценить эксплуатационную стойкость предлагаемых для закупки рельсов на стадии тендера.

Нами предложен также метод расчета относительной абразивной износостойкости ε при помощи коэффициента деформационного упрочнения D . Если в формуле (10) положить $k_1 = k_2$, то получим

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{D_1}{D_2}, \quad (11)$$

согласно которому чем выше значения коэффициента деформационного упрочнения материала, тем выше его износостойкость.

Для обоснования полученной теоретической зависимости (11) были проведены экспериментальные исследования в условиях изнашивания незакрепленные абразивные частицы на машине трения по схеме Бринелля. Испытания проводили на отожженных, а также закаленных и отпущенных при различных температурах образцах из сталей У8А и 30ХГСНА. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что коэффициент корреляции между коэффициентом деформационного упрочнения и износостойкостью материала имеет значения, близкие к единице (табл. 3).

Обработка с рассматриваемых позиций экспериментальных данных, полученных другими исследователями для различных материалов и при различных видах абразивного изнашивания, также показала высокую степень корреляции между коэффициентом деформационного упрочнения и износостойкостью материала (табл.3). Это свидетельствует о сильной функциональной зависимости между этими параметрами, близкой линейной, и хорошо согласуется с зависимостью (11).

Предложенный метод позволяет выявить сравнительную абразивную износостойкость трибосопряжения, не рассматривая детально структуру и сложную природу механизмов и явлений, происходящих в реальных материалах в процессе трения и изнашивания, а воспользоваться стандартными механическими характеристиками материала: σ_B - пределом прочности, σ_T - пределом текучести, ψ_K - относительным сужением.

Шестая глава посвящена практическим и экономическим аспектам разработанного метода расчета трибосопряжений. Рассмотрен термодинамический метод прогнозирования поверхностного разрушения трибосопряжений с использованием ряда предложенных энергетических и энтропийных критериев, а также энтропийно-кинетического подхода к проблеме изнашивания. Приведены примеры решения задач по оценке износостойкости при абразивном изнашивании, износа и относительной износостойкости рельсов, иллюстрирующие большие возможности, рациональность и перспективность термодинамического подхода.

Приведены расчеты экономической эффективности внедрения результатов исследования.

Таблица 3

Результаты обработки экспериментальных данных различных авторов

| Материал | Условия проведения эксперимента | | | | | Коэффициент корреляции | Авторы |
|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|--|------------------------------|---|------------------------|-------------------------------------|
| | Термо-обработка | Кол-во исследованных образцов | Условия изнашивания | Среда | Вид абразивного изнашивания | | |
| Сталь У8 , 30ХГСНА | Отжиг; закалка + отпуск | 22 | $P = 90 \text{ Н}$, $V = 0.38 \text{ м/с}$, время испытания 30 мин | Кварцевый песок | Изнашивание о незакрепленные абразивные частицы | 0,892 | Хачатурьян С.В., Тураев М.У. |
| Чистые металлы | Отжиг | 8 | $P=3 \text{ Н}$ $n = 0,0625 \text{ с}^{-1}$ $L=3 \text{ м}$ | Корундовое полотно (ЧАЗ=170) | Скольжение о закрепленные абразивные частицы | 0,9 | Хрущев М.М. |
| Сталь 45 | Закалка + отпуск | 4 | Энергия удара 0,5 кгм | Черный карбид кремния | Ударно-абразивное изнашивание | 0,952 | Сорокин Г.М. |
| | | 4 | Энергия удара 2 кгм | | | 0,917 | |
| Сталь 40Х | Двойная закалка | 15 | Х4-Б | Абразивная шкурка | Изнашивание при скольжении | 0,833 | Мухаммедов А.А., Шомаксудов С.М. |
| Медь МЗ, сталь 38Х, Алюминий АД1 | Наклеп | 10 | $P = 3 \text{ Н}$ | По ГОСТ 17367-71 | Изнашивание при скольжении | 0,947 | Лаврентьев А.И. |

В приложении дана статистическая оценка точности измерения исследованных параметров, приведены результаты экспериментальных исследований энергетического и энтропийного балансов абразивного изнашивания. Приведены обработанные с рассматриваемых термодинамических позиций экспериментальные данные других исследователей, которые были сопоставлены с результатами, полученными в нашей работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые проведены теоретические исследования процесса разрушения поверхностных слоев металлических материалов при трении с использованием термодинамических, дислокационных и термофлуктуационных представлений, получены аналитические зависимости и предложен ряд критериев для оценки износостойкости трущихся пар, что послужило научно-методологической основой для разработки инженерных методов расчета трибосопряжений.

2. На основе синтеза молекулярно-кинетического и энтропийного подходов к проблеме трения и изнашивания получена аналитическая зависимость для оценки износостойкости трибосопряжений, процесс фрикционного взаимодействия которых не осложнен химическим воздействием окружающей среды (в частности, для оценки износостойкости рельса).

3. Комплексно исследованы энергетический и энтропийный балансы и установлена взаимная связь термодинамических характеристик с закономерностями процесса абразивного изнашивания, что стало возможным благодаря разработанной методике, спроектированным и изготовленным специальной установкой, приспособлениям и блок-схемам, обеспечившим высокую точность результатов экспериментальных исследований.

4. Теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены новые свойства и закономерности поверхностного разрушения металлических материалов, заключающиеся в том, что разрушение происходит по мере накопления в деформируемых объемах пары трения плотности внутренней энергии и плотности энтропии предельной (критической) величины. Показано, что эти характеристики следует принимать в качестве критериев для оценки износостойкости, т. к. они не зависят от режимов трения и являются константами материала, коррелирующими с его теплофизическими свойствами, соответственно, с теплотой плавления и энтропией плавления материала.

5. Проведенные прямые экспериментальные исследования энергетического и энтропийного балансов и анализ полученных данных показал, что различные термодинамические критерии, предлагаемые другими авторами, недостоверны, т. к. величины их изменяются с изменением условий трения, поэтому они не могут быть приняты в качестве критериев оценки износостойкости пар трения.

6. Проведены теоретические исследования и произведена оценка достоверности и области применения:

- энергоемкости рельсовой стали в качестве критерия сравнительной износостойкости и сопротивления контактно-усталостным повреждениям термоупрочненных рельсов;
- коэффициента деформационного упрочнения в качестве критерия относительной абразивной износостойкости.

7. Результаты теоретических и экспериментальных исследований дали возможность разработать комплекс инженерных методов прогнозирования износостойкости трибосопряжений на стадии проектирования и изготовления, что позволило существенно сократить объем исследований или полностью их исключить и получить высокий технико-экономический эффект, а также повысить уровень подготовки специалистов.

8. Разработанная автором «Методика оценки эксплуатационной стойкости термоупрочненных рельсов» издана как нормативный документ в Государственной инспекции Республики Узбекистан по надзору за безопасностью железнодорожных перевозок «УЗЖЕЛДОРНАДЗОР» и рекомендована для использования предприятиями магистрального (ГАЖК «УЗБЕКИСТОН ТЕМИР ЙУЛЛАРИ») и промышленного (АО «УЗАВТОЙУЛ», АЛМАЛЫКСКИЙ ГМК, НАВОЙСКИЙ ГМК, «УЗБЕКЭНЕРГО», «УЗДОНМАХСУЛОТ», «УЗМЕТКОМБИНАТ», «УЗБЕКНЕФТЕГАЗ», «УЗБЕКТЕМИР», «УЗБЕККИМИЁСАНОАТ», «УЗКУРИЛИШМАТЕРИАЛЛАРИ») железнодорожного транспорта с целью проведения экспертной оценки эксплуатационной стойкости предлагаемых для приобретения рельсов в условиях тендера.

9. Научные разработки внедрены в локомотивной службе и управлении путевого хозяйства ГАЖК «Узбекистон Темир Йуллари» с экономическим эффектом 4,06 млрд. сум, подтвержденные актом по форме Р-10.

10. На основе обобщения полученных научных результатов исследования издано учебное пособие «Термодинамический метод расчета износостойкости деталей машин», материалы которого включены в учебные программы по дисциплинам «Износостойкость машин», «Износостойкость и ресурс машин» для магистров по специальностям: «Подъемно – транспортные машины», «Строительные и дорожные машины» в Ташкентском институте инженеров железнодорожного транспорта; «Тракторы» и «Сельскохозяйственные машины и оборудование» в Ташкентском Государственном Техническом Университете, а также «Материаловедение» в Андижанском Государственном Университете.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

а). Монографии и статьи, опубликованные в научных журналах:

1. Хачатурьян С. В. Термодинамический метод расчета износостойкости деталей машин. Учебное пособие. —Ташкент: ТашИИТ, 2004, - 66 с.
2. Хачатурьян С. В. Методика оценки эксплуатационной стойкости термоупрочненных рельсов.—Ташкент: Государственная инспекция Республики Узбекистан по надзору за безопасностью железнодорожных перевозок «Узжелдорнадзор», 2006.— 20 с.
3. Хачатурьян С. В. Оценка некоторых параметров эксплуатационной стойкости рельсовой стали энергоемкостью материала при пластической деформации. // Тяжелое машиностроение — Россия, Москва, 2006. - № 2. - С. 27-28.
4. Хачатурьян С.В. Термоактивационный подход к оценке износостойкости железнодорожных рельсов.// Вестник ТашИИТа. — Ташкент, 2006.- №1. - С. 128-135.
5. Хачатурьян С. В. Оценка износостойкости материалов с использованием энтропийных и кинетических представлений о повреждаемости и разрушении поверхностей трения.// Научно-технический Internet – журнал.— Россия, С-Петербург, www.tribo.ru Трение, износ, смазка, 2006. - Т.8, № 2. - С. 28 - 32.
6. Khachaturyan S. V., Turaev M. U. and Negmatov S. S. Prediction of relative wear resistance of rail steel based on energy capacity of plastic deformation. // Journal of Friction and Wear.- New York, Allerton Press, 2005.- Vol. 26, № 5,- pp 43-46.
7. Хачатурьян С. В. Энтропийный анализ процесса трения и изнашивания.// Научно-технический Internet – журнал. — Россия, Санкт - Петербург, www.tribo.ru Трение, износ, смазка. 2005.-Т.7,№ 2-3,- С.95-102.
8. Хачатурьян С. В., Тураев М. У., Негматов С. С. Прогнозирование относительной износостойкости рельсовой стали по энергоемкости материала при пластической деформации. // Трение и износ. Международный научный журнал АН Российской Федерации и АН Республики Беларусь.- Москва – Гомель, 2005.- Т. 26, № 5. - С. 497-501.
9. Хачатурьян С. В. Прогнозирование стойкости рельсов в пути.// Вестник Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта.- Ташкент, 2005.- № 1. - С. 63-67.
10. Хачатурьян С. В., Тураев М. У., Негматов С. С. Связь поверхностной прочности конструкционных материалов с коэффициентом деформационного упрочнения. // Научно-технический журнал ФерПИ.- Фергана, 2005.- №1. - С. 33-37.
11. Хачатурьян С. В., Джумабаев А. Б., Убайдуллаев С. К., Тураев М. У. Методика и средства проведения экспериментальных исследований сравнительной оценки абразивной износостойкости конструкционных материалов // Композиционные материалы. Узбекский научно-технический и производственный журнал.- Ташкент, 2005.- № 3.- С. 54-56.

12. Хачатурьян С. В., Тураев М. У., Негматов С. С. Исследование взаимной связи абразивной износостойкости конструкционных материалов с коэффициентом деформационного упрочнения. // Композиционные материалы. Узбекский научно-технический и производственный журнал. – Ташкент, 2005.- № 4. - С. 37-39.
13. Хачатурьян С. В. Энергетический критерий для оценки контактно-усталостной стойкости рельсовой стали. // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций. - Алматы, 2004. - №4 (29). С. 42-44.
14. Хачатурьян С. В. Энтропийный подход к процессам разрушения поверхностных слоев материала при фрикционном взаимодействии. // Композиционные материалы. Узбекский научно-технический и производственный журнал. – Ташкент, 2004.- № 3 (16). С. 29-31.
15. Хачатурьян С. В., Тураев М. У., Негматов С. С. Коэффициент деформационного упрочнения — критерий оценки относительной абразивной износостойкости металлов и сплавов. // Композиционные материалы. Узбекский научно-технический и производственный журнал. – Ташкент, 2004.- № 3 (16). - С. 36-38.
16. Хачатурьян С. В., Негматов С. С., Иргашев А. Результаты экспериментального исследования энтропийного баланса процесса абразивного изнашивания. // Вестник Ташкентского государственного технического университета, Ташкент, 2004. - № 3.- С. 18-21.
17. Хачатурьян С. В. Связь относительной износостойкости при абразивном изнашивании с модулем пластичности металлов. // Трение и износ. Всесоюзный научно-теоретический журнал АН СССР, АН БССР, 1991.-Т.12. №1. - С.136-143.
18. Хачатурьян С. В., Коршунов В. Я., Федоров В. В. Методика экспериментальных исследований энергетического баланса процесса изнашивания металлов при внешнем трении. // Заводская лаборатория. 1977. - № 7. - С. 892-895.
19. Федоров В. В., Хачатурьян С. В., Коршунов В. Я. Исследование взаимной связи закономерностей износа металлов с энергетическими характеристиками процесса внешнего трения. // Вестник ВНИИЖТ, 1977.-№ 4. - С. 30-34.
20. Хачатурьян С. В., Федоров В. В. Результаты экспериментального исследования энергетического баланса абразивного изнашивания материалов. // Доклады АН УзССР, 1974. № 3. - С. 11-12.

б) Патенты и авторские свидетельства

21. Хачатурьян С.В., Хамдамов У. Р., Джумабаев Д.А., Махмудов С.С., Нурматов М., Тураев М.У. Рельсларнинг эксплуатацион мустахкамлигини бахолаш дастури // Узбекистон Республикаси Давлат Патент Идораси. Гувоҳнома № DGU 01219, 30.01.07.
22. Тураев М.У., Зиямухамедова У. А., Махмудов С.С., Нурматов М., Убайдуллаев С.К., Хачатурьян С.В. Трибожуфтларнинг абразив

ейилишбардошлилигини истикболлаш дастури // Узбекистон Республикаси Давлат Патент Идораси. Гувоҳнома № DGU 01218, 30.01.07.

в). Статьи, опубликованные в сборниках научных трудов, тезисов докладов и депонированных научных работ:

23. Хачатурьян С. В. Термодинамический анализ процесса изнашивания материалов. // «Новые технологии получения композиционных материалов на основе местного сырья и их применение в производстве»: Сб. тез. респ. науч.техн. конф. - Ташкент, 2005. - С. 84-85.

24. Хачатурьян С. В. Прогнозирование износостойкости рельсов.// Повышение износостойкости и долговечности машин и механизмов на транспорте: Сб. трудов III Международного симпозиума по транспортной триботехнике — С - Петербург, 2005. - С.79-83.

25. Негматов С.С., ТураевМ., Хачатурьян С.В. Влияние процессов упрочнения и разупрочнения на характер разрушения поверхностных слоев при фрикционном взаимодействии. // Проблемы механики и сейсродинамики сооружений: Материалы международной конференции - Ташкент, 2004. - С. 344-347.

26. Хачатурьян С. В., Тураев М., Негматов С. С. Оценка абразивной износостойкости наклепанных металлических материалов коэффициентом деформационного упрочнения.// Современные проблемы механики машин. Актуальные проблемы развития наземной транспортной системы: Сб. докл. Респ. науч.-техн. конф. с участием зарубежных ученых. — Ташкент, 2004.- С. 407-409.

27. Хачатурьян С. В., Федоров В. В. Энтродийный критерий и прогнозирование абразивной износостойкости. // Триботехника-машиностроению: Тез. докл. Пятой науч.-технич. конф. -Нижний Новгород, 1991. - С.13.

28. Хачатурьян С. В. Энтродийный анализ процесса изнашивания металлических сплавов. // Современные методы термической, химико - термической обработки и поверхностного упрочнения деталей машин и инструмента: Тез. докл. Респ. науч.-техн. конф.- Ташкент, 1990. - С. 63.

29. Хачатурьян С. В. Термодинамические и кинетические представления абразивного изнашивания металлов.// Научные и прикладные проблемы теории трения и изнашивания: Тез. докл. конф. – Харьков, 1989. - С. 7.

30. Панин В. Е. Федоров В. В., Ромашов Р. В., Хачатурьян С. В., Коршунов В. Я. Явления структурно-энергетической аналогии процессов механического разрушения и плавления металлов и сплавов.// Синергетика и усталостное разрушение металлов:— М.: Наука. 1989. - С. 29-44.

31. Федоров В. В., Буше Н. А., Ромашов Р. В., Хачатурьян С. В., Федоров С. В. Структурно – энергетические свойства предельно деформированных металлов сплавов. // Сильно-возбужденное состояние в кристаллах: Тез. докл. I конф. – Томск, 1988. - С. 39-40.

32. Федоров В. В., Хачатурьян С. В. Термодинамические аспекты трения и износа. // Трение, износ и смазочные материалы: Труды международной науч. конф. АН СССР. — М., 1985.- С. 200-205.
33. Хачатурьян С. В. Связь абразивной износостойкости с механическими свойствами металлов. // Современная технология и перспективы развития упрочняющих методов обработки машин и инструментов: Тез. докл. Респ. науч.-техн. конф. - Ташкент, 1984. - С. 67-68.
34. Коршунов В. Я., Федоров В. В., Хачатурьян С. В. Термодинамический метод прогнозирования долговечности узлов трения. // Тез. докл. II Всесоюзного съезда по теории механизмов и машин. - Одесса, 1982- С. 43.
35. Ромашов Р. В., Федоров В. В., Хачатурьян С. В. Термодинамическая теория прочности. // Аннотация докл. V Всесоюзного съезда по теоретической и прикладной механике. - Алма-Ата, 1981. - С. 306.
36. Хачатурьян С. В. Оценка процесса абразивного изнашивания на основе теплофизических свойств материалов. // Тез. докл. VIII Всесоюзного симпозиума по механохимии и механоэмиссии твердых тел. - Ташкент, 1979. - С. 147-148.
37. Федоров В. В., Хачатурьян С. В., Коршунов В. Я. Исследование взаимной связи износостойкости и долговечности подшипниковых материалов с энергетическими характеристиками процесса трения скольжения. // Материалы II Международного симпозиума о посадках скольжения. — Братислава, ЧССР, 1977. - С. 125-129.
38. Хачатурьян С. В. Исследование энергетического баланса изнашивания металлов о закрепленные абразивные частицы при внешнем трении. / Дис. ... канд. техн. наук — М.: МИНХ и ГП. 1977. -217- с.
39. Федоров В. В., Хачатурьян С. В. Термодинамический метод прогнозирования износостойкости некоторых деталей тепловозов.// Вопросы динамики и диагностики технического состояния тепловозов: Труды ТашИИТа. - Ташкент, 1975, вып. 116. - С. 76-79.
40. Федоров В. В., Мошков А. Д., Бершадский С. М. , Хачатурьян С. В. Термодинамический метод оценки изнашивания материалов при внешнем трении. // Материалы I Международного симпозиума о посадках скольжения.— ЧССР, 1972. - С. 187-194.
41. Хачатурьян С. В. Методика и установка для исследования энергетического баланса процесса изнашивания материалов при внешнем трении // Производство и научно-техническое творчество молодых ученых и специалистов: Материалы I Респ. науч.-технич. конф. — Ташкент, 1972 - С. 87-88.

Личный вклад в совместные публикации. В публикациях, составляющих основу диссертации, автору принадлежит общая постановка задач исследования, теоретические разработки, участие в проведении экспериментов, анализ и обобщение полученных результатов и рекомендации к внедрению.

Техника фанлари доктори илмий даражасига талабгор
Хачатурьян Станислав Валентиновичнинг 05.02.04. – Машиналарда
иш=аланиш ва ейилиш» ихтисослиги бйича «Термодинамик ёндовуни
=ыллаб трибобирикмалар ейилишбардошлилигини комплекс бащолаш тизими»
мавзусидаги диссертациясининг

РЕЗЮМЕСИ

Таянч сызлар: иш=аланиш, ейилиш, ейилишга бардошлилик, пластик деформация, =адо=лов, яширин энергия, энергетик баланси, ички энергия, иш=аланишнинг исси=лик эффекти, ички энергиянинг критик зичлиги, эриш энталпияси, энтропик баланси, энтропияни ишлаб чи=иши, энтропиянинг о=ими, энтропиянинг критик зичлиги, дисспатив тузилишлар, кинетик ёндашиш, фаоллаштирувчи энергия, ызаро бо\ли=лик (корреляция), энергия си\ими, башоратлаш.

Тад=и=от объектлари. Абразив муцит шароитидаги трибо жуфларнинг ейилишини, атроф муцит билан кимёвий таъсирланмайдиган иш=аланиш жуфтларининг ейилишини бащолаш, щамда рельснинг нисбий ейилиш бардошлилигини бащолаш.

Ишнинг ма=сади. Иш=аланишда метал материалларнинг сирт=и =атлами емирилиш жараёнини термодинамик, дислокацион ва термофлуктуацион тасавурлардан фойдаланиб назарий ва экспериментал тад=и=отлаш ва шулар асосида ызаро фрикцион таъсирида былган конструкцион материалларнинг сирт мустацкамлигини башоратлаш, аналитик щисоблаш услубларини ишлаб чи=иш.

Тад=и=от усуллари. Термодинамиканинг I ва II =онунларидан, термодинамиканинг =айтмас жараени назарияси юту=ларидан, дислокация ва =атти= жисмларнинг емирилишини термофлуктуацион назарияларидан фойдаланилган термодинамик усул.

Олинган натижалар ва уларнинг янгилиги. Илк бор абразив ейилиш жараёни =онуниятлари асосида энергетик ва энтропик балансини комплекс тад=и=отлаб натижалар олинган.

Абразив ейилиш жараёнининг энергетик ва энтропик баланси экспериментал изланиш блок схемаси, ускунаси, махсус =урилмаси, оригинал услуби ишлаб чи=илган.

Иш=аланувчи жуфтликни деформацияланувчи хажмидаги ички энергия зичлигининг чегаравий =иймати ёки энтропия зичлигининг чегаравий =ийматини йи\илишидан келиб чи=адиган емирилишга асосланган, метал материаллари сирт емирилиш =онуниятлари ва янги хусусиятлари назарий исботланган ва экспериментал тасди=ланган. Ушбу хусусиятларни иш=аланиш шароитига бо\ли= эмаслиги ва материал исси=лик - физик хусусияти билан ызаро бо\ли= физик ызгармаслиги кырбатилган.

Конструкцион метал материалларни ейилишга бардошлилигини бащолаш учун =атор янги термодинамик мезонлар таклиф этилган: ички энергия зичлиги чегараси, энтропия зичлиги чегараси, пластик деформация

жараёнида материалнинг энергия си\ими ва деформацион мустацкамланиш коэффициенти. Иш=аланувчи жуфтликларни ишга лае=атлилигини баццолаш ва башорат =илиш илмий услубий асосига хизмат =илувчи аналитик бо\ланишлар топилган.

Амалий аццамияти. Абразив ейилиш шароитида ишловчи материаллар ва релсларни ейилишга чидамлилиги ва ейилишини щисоблаш услублари ишлаб чи=илган. Изланиш натижаларининг тадби\и материалларни ейилишга бардошлилигини лойихалаш бос=ицида башоратлашга щамда магистрал ва саноат транспорти корхоналар томонидан тендер жараенида сотиб олинаётган рельсларини ейилишга чидамлилигини эксперт баццолаш имконини берди. Ызбекистон Республикасининг Давлат Патент Идорасидан 2 патентга гувощнома олинган.

Тадби= этиш даражаси ва и=тисодий самарадорлиги. Илмий изланишлар «Ызбекистон Темир Йыллари» ДАТЙК 4,06 млрд. сым и=тисодий самарадорлиги билан тадби= =илинган ва Р-10 форма акт билан тасди=ланган. Тош ТЙМИ, ТДТУ ва Андижон университетида бакалавр ва магистрлар таерлаш учун ы=ув жараёнларига тадби= =илинган.

+ылланиш сощаси. Тад=и=от натижаларидан ишлаб чи=ариш шароитида машина ва механизмларнинг иш=аланувчи =исмларини лойищалашда, темир йыл транспорти корхоналари учун рельсларни танлаш ва ишлатишда щамда техника Олий Ы=ув Юртларнинг мутахассислик фанлари ы=ув жараёнида фойдаланиш мумкин.

Р Е З Ю М Е

диссертации Хачатурьяна Станислава Валентиновича на тему:
«Комплексная система оценки износостойкости трибосопряжений с
использованием термодинамического подхода»
на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности
05.02.04 – Трение и износ в машинах.

Ключевые слова: трение, износ, износостойкость, пластическая деформация, наклеп, скрытая энергия, энергетический баланс, внутренняя

энергия, тепловой эффект трения, критическая плотность внутренней энергии, энтальпия плавления, энтропийный баланс, производство энтропии, поток энтропии, критическая плотность энтропии, энтропия плавления, кинетический подход, энергия активации, энергоемкость, коэффициент деформационного упрочнения, корреляция, прогнозирование.

Объекты исследования. Оценка изнашивания трибосопряжений, работающих в условиях абразивной среды, и трущихся пар, в которых процесс трения не сопровождается химическим взаимодействием с окружающей средой, а также оценка относительной износостойкости железнодорожных рельсов.

Цель работы. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса разрушения поверхностных слоев металлических материалов при трении с использованием термодинамического подхода и разработка расчетно-аналитических методов прогнозирования износостойкости трибосопряжений на стадии проектирования и изготовления.

Метод исследования. Термодинамический, с использованием I и II начал термодинамики, достижений термодинамики необратимых процессов, теории дислокаций, термофлуктуационной теории разрушения твердых тел.

Полученные результаты и их новизна. Впервые проведены и получены уникальные результаты комплексных исследований энергетического и энтропийного баланса с закономерностями процесса абразивного изнашивания.

Разработана оригинальная методика, специальная установка, приспособления и блок-схемы экспериментальных исследований энергетического и энтропийного баланса процесса абразивного изнашивания.

Теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены новые свойства и закономерности поверхностного разрушения металлических материалов, заключающиеся в том, что разрушение происходит по мере накопления в деформируемых объемах пары трения плотности внутренней энергии предельной (критической) величины или плотности энтропии предельной (критической) величины. Показано, что эти характеристики не зависят от условий трения и являются физической константой, коррелирующей с теплофизическими свойствами материала.

Предложен ряд новых термодинамических критериев для оценки износостойкости конструкционных металлических материалов: критическая плотность внутренней энергии, критическая плотность энтропии, энергоемкость материала в процессе пластической деформации и коэффициент деформационного упрочнения и получены аналитические зависимости, послужившие научно-методологической основой прогнозирования и оценки работоспособности трибосопряжений.

Практическая значимость. Разработаны методы расчета износа и относительной износостойкости рельсов и деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания, что позволит прогнозировать износостойкость трибосопряжений на стадии проектирования, а также осуществлять

экспертную оценку износостойкости рельсов, приобретаемых предприятиями магистрального и промышленного транспорта в стадии тендера. Получено 2 патента в Государственном Патентном Ведомстве Республики Узбекистан.

Степень внедрения и экономическая эффективность. Научные разработки внедрены в ГАЖК «Узбекистон Темир Йуллари» с экономическим эффектом 4,06 млрд. сум, подтвержденный актом по форме Р-10, и в учебном процессе ТашИИТа, ТГТУ и Андижанского университета при подготовке бакалавров и магистров.

Область применения. Результаты исследования можно использовать в производственных условиях при проектировании узлов трения машин и механизмов, при закупке рельсов для предприятий железнодорожного транспорта, а также в учебном процессе технических высших учебных заведений.

RESUME

Thesis of Stanislav Valentinovich Khachatryan on the scientific degree competition of the doctor of technical sciences in speciality 05.02.04. –“Friction and wear in machines”

subject: “Complex system of estimating friction pair’s wear resistance using thermodynamic approach“

Key words: friction, wear, wear resistance, plastic deformation, cold work, stored energy, energy balance, internal energy, friction heat energy, critical density of internal energy, enthalpy, entropy balance, entropy production, entropy, critical density of entropy, entropy of melting, kinetic approach, activation energy, capacity of energy accumulation, coefficient of deformation hardening, correlation, forecasting.

Subjects of the inquiry. Estimating abrasive wearing of machine parts and wear resistance of friction pairs in which the processes do not accompany with chemical interaction with the environment and also relative wear resistance of rails.

Aim of the inquiry. Theoretical and test investigation of metal materials wearing using thermodynamic, dislocation, kinetic approaches and working out on this base calculating methods of forecasting surface strength of materials during friction process.

Method of inquiry. Thermodynamic methods using the I and II laws of the thermodynamic, achievements of the irreversible thermodynamic, dislocation and kinetic theories of materials strength.

The results achieved and their novelty. Pathbreaking tested and received unique results of investigation of energy and entropy balances with abrasive wearing process.

An original method, special testing set, devices, flow charts for testing energy and entropy balances of abrasive wearing process are worked out

Theoretically based and acknowledged by tests new properties and laws of metal wearing process consisted in that wear takes place when deformed volumes of friction pairs accumulate limit density of internal energy or limit density of entropy. Showed that these characteristics do not depend on friction conditions and there are constants correlated with thermal physic properties of materials.

Suggested a few thermodynamic criteria for estimating wear resistance of metals and alloys: limit density of internal energy, limit density of entropy, material capacity of energy accumulation, coefficient of deformation hardening and obtained analytical equations which are the scientific base of estimating and forecasting wear resistance of friction pairs.

Practical value. Worked out a method of calculating friction pairs abrasive wear and rails wear resistance which give an opportunity for forecasting wear resistance of materials during designing stage and also use Delphi methods for estimating wear resistance of rails purchased by the railway enterprises on tender stage. Obtained 2 patents in the State Patent Department of Republic of Uzbekistan.

Degree of embed and economic effectivity. The scientific works out are introduced in Railway Company “Uzbekiston temir yullari” with economic effect about 4 060 000 000 sum, and also in education process in the Tashkent Institute of Railway Engineering, in the Tashkent State Technical University and Andijan State University.

Sphere of usage. The results of investigation may be used at designing of machines and mechanisms friction units, at purchasing rails by the railway transport enterprises and also in education process in High school.

Соискатель:

С. В. Хачатурьян.