

На правах рукописи



ШАЛЫГИН МИХАИЛ ГЕННАДЬЕВИЧ

**ИЗНАШИВАНИЕ СУБШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ
В ВОДОРОДСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЕ**

Специальность 05.02.04 – «Трение и износ в машинах»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Брянск – 2017

Работа выполнена на кафедре «Управление качеством, стандартизация и метрология» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Научный консультант

Суслов Анатолий Григорьевич,
Заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Гриб Владимир Васильевич,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Производство и ремонт автомобилей и
дорожных машин» ФГБОУ ВО «Московский
автомобильно-дорожный государственный
технический университет (МАДИ)»

Скотникова Маргарита Александровна,
доктор технических наук, профессор, заведующая
кафедрой «Машиноведение и основы
конструирования» ФГАОУ ВО «Санкт-
Петербургский политехнический университет
Петра Великого»

Погоньшев Владимир Анатольевич,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Математики, физики и информатики»
ФГБОУ ВО «Брянский государственный
аграрный университет»

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет»

Защита состоится «05» декабря 2017 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д999.112.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук», Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет», по адресу: 241035, г. Брянск, ул. Харьковская, д. 10 б, ауд. Б 101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» и на сайте:
<http://www.tu-bryansk.ru/content/nauka/zacsh>

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



В.А. Хандожко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. При работе узлов трения в водородсодержащих средах, воздействие водорода на поверхностный слой металла определяет срок службы деталей. Наибольшую проблему оно представляет для тех пар, где является преобладающим над другими видами изнашивания. Наиболее полно водородное изнашивание проявляется в поршневых кольцах двигателей внутреннего сгорания, насосах для перекачивания нефтяных вязких, газотурбинном оборудовании и многих других узлах трения.

Согласно исследованиям, широко освещенным в научной литературе, водородное изнашивание является основной причиной износа поршневых колец двигателей внутреннего сгорания. К изготовлению поршневых колец предъявляются повышенные требования. Работая в условиях повышенных температур и углеводородной среды, поршневые кольца подвергаются интенсивному водородному изнашиванию, при этом к точности размеров, к форме кольца и к шероховатости наружной поверхности предъявляются особые требования. Остро проблема водородного изнашивания стоит в узлах трения, работающих в водородных средах, что имеет место в битумных насосах. В связи со сложным профилем зуба его поверхностное упрочнение носит весьма затруднительный характер. Незначительные отклонения в профиле зуба или качестве его поверхности приводит к сильным шумам при эксплуатации и интенсивному изнашиванию. Водородное изнашивание происходит на атомарном уровне, при этом в современной научной и технической литературе отсутствуют расчетные зависимости, позволяющие определить интенсивность изнашивания на уровне субшероховатости.

Целью работы является повышение износостойкости поверхностей трения деталей машин, работающих в водородсодержащей среде, с учетом их субшероховатости.

В работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработать модель механического изнашивания поверхностей трения на уровне субшероховатости поверхности.
2. Разработать модель молекулярного изнашивания на уровне субшероховатости поверхности.
3. Доработать модель совместного молекулярно-механического изнашивания с учетом влияния водородного износа.
4. Определить взаимосвязь субшероховатости поверхности с зернистостью материала.
5. Разработать и изготовить установку для обезводороживания металлических образцов.
6. Разработать и изготовить автоматизированную испытательную установку для проведения испытаний на износ образцов при наличии смазывающего материала.
7. Разработать и изготовить установку для определения механической и молекулярной составляющих коэффициента трения, а также силы адгезионного взаимодействия ювенильных поверхностей.
8. Исследовать влияние структуры материала на интенсивность

изнашивания в условиях водородной среды.

9. Разработать функционально-ориентированную технологию повышения износостойкости деталей машин, подверженных водородному изнашиванию.

10. Разработать рекомендации по использованию результатов исследований. Реализовать положительные результаты исследований в промышленности.

Объект и предмет исследования. Объектом исследований являются трибосопряжения, работающие в водородсодержащей среде и, подверженные интенсивному водородному изнашиванию.

Предметом исследования является разработка новых математических моделей определения износа поверхностей трения на уровне субшероховатости, а также разработка и применение технологических методов, снижающих водородное изнашивание поверхностей трения и износ деталей в целом.

Методы и достоверность исследований. Теоретические и эмпирические исследования проводились на базе современных представлений о нанонеровностях поверхностей металлических деталей. В работе использованы основные положения теории трения, теории изнашивания, известные закономерности проектирования комбинированных технологических воздействий, теории дислокаций, основные положения теории подобия, регрессионный и дисперсионные анализы, основных положений теории строения кристаллических тел, теорий упругости и пластичности, теории усталостного износа, адгезионной теории и теории автоматического управления.

Достоверность результатов подтверждается экспериментальными исследованиями, применением современных технических средств при анализе, приемлемой сходимостью теоретических и эмпирических результатов, а также реализацией результатов исследований в промышленности.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана математическая модель механического изнашивания поверхностей трения на уровне субшероховатости, на основе усталостной теории изнашивания, с учетом пластического и упругого контакта, а также среза, основанная на параметрах зернистости материала;
- разработана математическая модель молекулярного изнашивания поверхностей трения на уровне субшероховатости, на основе адгезионной теории, с применением положений теории дисперсионного взаимодействия, основанная на структуре и свойствах кристаллической решетки материала;
- доработана модель молекулярно-механического изнашивания субшероховатости поверхностей трения, включающая коэффициент, учитывающий влияние биографического водорода на износ;
- установлена корреляция субшероховатости и зернистости материала, получены уравнения связи размера зерна и шага субшероховатости;
- доказана возможность повышения износостойкости поверхностей трения, работающих в водородных средах за счет уменьшения их зернистости.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- разработана и изготовлена автоматизированная машина трения, позволяющая проводить испытания на износ при вращательном или возвратно-поступательном движении;

- разработана и изготовлена установка для обезводораживания деталей;
- разработана и изготовлена установка для определения механического и молекулярного коэффициентов трения, а также силы адгезионного взаимодействия ювенильных металлических поверхностей;
- предложена и обоснована технология комплексной функционально-ориентированной обработки поверхностей трения, включающая термическую обработку, высоковакуумный отжиг и ионную имплантацию, повышающая износостойкость деталей, работающих в водородных средах;
- реализованы положительные результаты исследований в промышленности и получен экономический эффект на сумму более 2,9 млн. руб.

Положения, выносимые на защиту, включают:

- теоретическую модель молекулярно-механического изнашивания поверхностей трения на уровне субшероховатости;
- математическую модель механического изнашивания поверхностей трения на уровне субшероховатости, на основе усталостной теории, с учетом пластического и упругого контакта, а также среза;
- математическую модель молекулярного изнашивания поверхностей трения на уровне субшероховатости, на основе адгезионной теории, с применением положений теории дисперсионного взаимодействия;
- установленную взаимосвязь субшероховатости и зернистости материала, полученные уравнения связи зерна и субшероховатости;
- технологию комплексной функционально-ориентированной обработки поверхностей трения, включающую термообработку, высоковакуумный отжиг и ионную имплантацию, снижающую воздействие водородного изнашивания поверхностей трения и износ деталей в целом;
- результаты теоретических и экспериментальных исследований поверхностей трения при различных методах обработки в условиях водородной среды.

Личный вклад соискателя. Автором получены лично основные положения, выносимые на защиту. Автор выражает благодарность за возможность использования высокотехнологичного оборудования при проведении исследований АО «УК «Брянский машиностроительный завод», АО «ПК «Бежицкая сталь», ЗАО «Группа Кремний ЭЛ», ОАО «Клинцовский завод поршневых колец», ООО «ПКК «Битнас», ОАО «Гомсельмаш».

Реализация результатов. Отдельные результаты диссертационного исследования включены в план модернизации на ОАО «Клинцовский завод поршневых колец» и внедрены на ООО «ПКК «Битнас» и ООО «Биттех», что подтверждается соответствующими актами. Экономический эффект от внедрения результатов исследования составил более 2,9 млн. руб.

Апробация работы.

Основные положения и наиболее важные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 10 международных конференциях:

- Первая международная научно-техническая конференция «Техника и технологии» (г. Брянск, 23-25 июня 2014 г.);

- Первая международная научно-техническая конференция «Тенденции развития техники и технологий» (г. Тверь, 17-19 февраля 2015 г.);
- Вторая международная научно-техническая конференция «Наука, образование, производство» (г. Брянск, 06-08 октября 2015г.);
- Двадцать восьмая международная инновационно-ориентированная конференция молодых учёных и студентов «МИКМУС-2015» (ИМАШ РАН, г. Москва, 02-04 декабря 2015 г.);
- Двадцать третья международная научно-практическая конференция «Примеры фундаментальных и прикладных исследований» (МиС, г. Новосибирск, 12-13 февраля 2016 г.);
- Десятая международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург, 16-20 мая 2016 г.);
- Девятая международная научно-техническая конференция «Трибология - машиностроению» (ИМАШ РАН, г. Москва, 01-03 ноября 2016 г.);
- Международная научная конференция «Механика и трибология транспортных систем - 2016» (РГУПС, г. Ростов-на-Дону, 08-10 ноября 2016 г.).
- Седьмая Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации)». (ИРНИТУ, г. Иркутск, 26-28 апреля 2017 г.).
- Шестнадцатая Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Механики XXI веку». (БрГУ, г. Братск, 17-18 мая 2017г.).

Отдельные положения диссертации докладывались и обсуждались на международном семинаре «Функциональное упрочнение, повышение работоспособности рабочих поверхностей деталей машин и технологической оснастки» (ГГТУ им. П.О. Сухого, г. Гомель, Беларусь, 29 мая 2014 г.).

Диссертационная работа заслушана в полном объеме на заседании научно-технического совета ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьёва» (г. Рыбинск), научного семинара «По трению и износу в машинах» им. М.М. Хрущева отдела «Трение, износ и смазка. Трибология» ФГБУН Институт машиноведения им.А.А. Благонравова Российской академии наук (г. Москва), научно-технического семинара по механике и физике фрикционного контакта кафедры «Прикладной физики» ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» (г. Тверь), расширенном заседании кафедры «Прикладная механика» ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» (г. Ростов-на-Дону), кафедры «Управление качеством, стандартизация и метрология» и секции «Трение и износ в машинах» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» (г. Брянск).

Научные отчеты по материалам диссертационной работы являются лауреатами открытого конкурса на лучшую научную работу ученых Брянской области по естественным, техническим и гуманитарным наукам «Наука области - Брянщине» в 2014 и 2015 гг. Разработанные испытательные установки неоднократно становились лауреатами открытых конкурсов «Инновационные

товары, созданные на предприятиях и в организациях Брянской области» и «На лучшее изобретение и рационализаторское предложение» в 2014, 2015 и 2016 гг.

Публикации. Всего опубликовано 80 научных работ, из них 28 статей в ведущих периодических изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией, 2 публикации в зарубежных изданиях, включенных в международные реферативные базы, получены 16 патентов и 2 свидетельства на программное обеспечение. По теме диссертации опубликовано 37 научных работ общим объемом 18,4 печ. л., в том числе 20 публикаций в ведущих периодических изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией, 2 публикации в зарубежных изданиях, включенных в международные реферативные базы (Web of Science, Scopus). Получены 3 патента на полезную модель, 1 решение о выдаче патента, 1 свидетельство на программу для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, основных результатов и выводов, списка использованной литературы, содержащего 333 источника и приложений. Работа изложена на 235 страницах, содержит 64 рисунка и 26 таблиц. Общий объем работы составляет 254 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, изложены ее научная новизна и практическая значимость, приведена краткая характеристика работы.

В первой главе выполнен анализ состояния вопроса изнашивания субшероховатости. Проанализированы существующие теории трения и изнашивания. Проведен анализ современных представлений о контактном взаимодействии поверхностей трения и водородном изнашивании. Определены цель и задачи исследования.

Современное состояние науки о контактном взаимодействии поверхностей трения в своих трудах изложили И.И. Артемов, В.Ф. Безъязычный, А.В. Белый, К. Веллингера, К.Н. Войнов, Л.А. Галин, И.С. Гершман, Д.Г. Громаковский, И.Г. Горячева, Н.Б. Демкин, А.А. Дубинин, И.Д. Ибатуллин, В.В. Измайлов, В.Н. Кащеев, С.П. Козырев, С.С. Кутателадзе, М.Е. Кэмпбелл, Х. Менг, В.Ф. Макаров, А.Д. Макаров, Н.М. Михин, А.Н. Мохель, А.Г. Наумов, В.Е. Панин, С.В. Пинегин, В.А. Погоньшев, Н. Роджерс, Э.В. Рыжов, А.Г. Суслов, И.А. Солдатенков, К. Фуллер, Х. Чан, М. Чиаварелла, В.В. Шевеля, В.Ю. Шолом, Л.Ш. Шустер и др. Основные положения теории водородного изнашивания присутствуют в работах Д.Н. Гаркунова, В.И. Колесникова, В.Я. Матюшенко, Э.Л. Мельникова, И.Э. Пашковского, А.А. Полякова, Н.Ф. Соловья, М.Е. Ставровского, В.В. Торопа и др.

Большой вклад в развитие учения о трении, износе и смазке сделали А.С. Ахматов, А.Ю. Албагачиев, Э.Д. Браун, Ф.П. Боуден, Н.А. Буше, И.А. Буяновский, А.В. Белый, А.С. Васильев, А.В. Вершинский, Н.А. Воронин, И.Г. Горячева, Д.Н. Гаркунов, В.Ф. Глоган, В.В. Гриб, Б.В. Дерягин, Н.Б. Демкин, А.Х. Джанахмедов, К.Л. Джонсон, Ю.Н. Дроздов, С.М. Захаров, Г.С. Ивасышин, Д.А. Индейцев, В.В. Измайлов, Б.И. Костецкий, И.В. Крагельский, В.И. Колесников, В.С. Комбалов, Л.И. Куксенова, В.Л. Лашхи, Н.М. Михин, Н.К. Мышкин, В.Е. Панин, С.Г. Псахье, А.С. Проников, Ю.А. Розенберг, П.А. Ребиндер, А.А. Рыжкин, М.А. Скотникова, А.Г. Суслов, А.И. Свириденко,

В.П. Тихомиров, Д. Тейбор, М.М. Хрущов, Н.М. Чичинадзе, Л.Ш. Шустер и др.

Анализ существующих теорий показал, что часть теорий склоняется к механической природе трения, часть теорий объясняет трение как действие молекулярных сил. В то же время широко распространены двучленные теории трения, которые учитывают как механическую, так и молекулярную составляющие. Анализ публикаций в области контактного взаимодействия и изнашивания указывает на недостаточную проработанность вопроса изнашивания на уровне субшероховатости поверхности. Анализ литературных данных по водородному изнашиванию позволил сделать заключение о недостаточной проработанности вопроса водородного изнашивания и, в частности, методов снижения водородного изнашивания деталей, работающих в водородсодержащих средах. Анализ литературных источников позволил сделать следующие выводы:

1. В настоящее время практически отсутствуют исследования по субшероховатости поверхности и стандартизованному параметру шагу по вершинам локальных выступов S и их влияние на износ поверхностей трения.

2. Несмотря на большое число теоретических работ, направленных на определение износа поверхностей трения, до настоящего времени не разработаны методы, позволяющие оценить интенсивность изнашивания поверхностей с учетом их субшероховатости, учитывающие механическую и молекулярную составляющие износа.

3. Недостаточно решены задачи снижения водородного изнашивания узлов трения, работающих в водородсодержащей среде.

4. Требуют уточнения вопросы взаимосвязи субшероховатости с другими неровностями поверхности.

5. При расчетах не учитываются субшероховатости контактирующих поверхностей трения и наличие водорода.

На основе результатов анализа публикаций по рассматриваемой проблеме сформулированы цель диссертационной работы и задачи исследований, необходимые для её достижения.

Во второй главе описаны общая стратегия исследований, теоретическая и экспериментальная методологии исследования, разработанные и серийные установки и приборы, используемые в работе.

Теоретические исследования базируются на основных положениях молекулярно-механической теории трения, теории изнашивания, современной статистической теории и методологии, теории контактного взаимодействия деталей, теории усталостного изнашивания, а также на широком применении основных положений технологии машиностроения.

Теоретические исследования состояли из нескольких этапов. На первом этапе проводилось исследование с целью разработки метода определения объемов, отделяемых при механическом изнашивании выступов субшероховатости. На втором этапе проводилось определение молекулярной составляющей износа. На третьем этапе проводилось исследование взаимосвязи субшероховатости поверхности с шероховатостью поверхности и зернистостью материала. На четвертом этапе проводился анализ существующих способов и методов снижения водородного изнашивания стальных поверхностей.

В исследованиях применялись плоские образцы, изготовленные из сталей марок 45, 40х, 40х13, антифрикционных чугунов марок А-ВПЧ и А-ХМ. Все образцы механически и термически обрабатывались. Сталь 45 и 40х подвергались закалке до температуры 840°C , сталь 40х13 - закалке до температуры 955°C . Охлаждение сталей проводилось в воде, при температуре 230°C , в течение 1 часа. Часть образцов подвергалась ионной имплантации кремнием, часть образцов - высоковакуумному отжигу, часть – комплексной функционально ориентированной обработке, включающей термическую обработку, высоковакуумный отжиг и ионную имплантацию. Часть образцов из чугуна А-ВПЧ покрывались хромом.

Для проведения испытаний на износ была разработана и изготовлена специальная автоматизированная установка – машина трения. Температура в зоне трения измерялась бесконтактным методом, путем направления луча датчика на границу контакта образец-контртело. С помощью датчика расстояния производилось измерение совместного линейного износа образца и контртела. Данные измерения проводятся с целью автоматизированного донагружения образца в процессе испытаний. С этой же целью установка оснащена датчиком мощности. В момент, когда совместный износ образца и контртела достигает некоторой критической величины, сила, с которой образец прижимается к контртелу начинает убывать. Усилие, прилагаемое электродвигателем для того, чтобы сдвинуть образец относительно контртела, начинает уменьшаться. Уменьшение такого усилия фиксируется с помощью датчика мощности, установленного на валу электродвигателя. Совместное использование датчиков мощности и расстояния позволяет значительно снизить погрешность при автоматизированном донагружении образца. Число циклов измеряется с помощью датчика циклов. На торец образца наносится специальный маркер, который рассеивает направленный на него свет. В момент, когда образец, совершая вращательные движения отходит с поля действия лазера датчика циклов, происходит подсчет числа циклов.

Управление установкой осуществляется с помощью ПК. После запуска программы управления требуется задать длину трения $L=2\pi R$, которую проходит крайняя точка образца за один цикл, радиус образца R , предельное значение износа h_d , после которого испытания следует прекратить, длину образца H_0 , скорость его скольжения $V=2\pi R/T_{\text{окр}}$, массу образца m , требуемую нагрузку P_0 , частоту вращения $T_{\text{окр}}$. На начальном этапе машина трения проводит расчет значения нулевой нагрузки после подвода образца к контртелу, также производится определение начальных значений износа h_0 и температуры T_0 и установка счетчика числа циклов на ноль $n_{\text{ц}}=0$.

В процессе испытаний определяется коэффициент трения $k = F_{\text{тр}}/N$ в текущий момент времени. Для этого вычисляется ускорение $a = V^2$, сила сопротивления опоры $N = mg$, сила трения $F_{\text{тр}} = P - ma$. Сила трения определяется по второму закону Ньютона. Если на тело действует постоянная сила $P > F_{\text{тр}}$, параллельная поверхности соприкасающихся тел, при скольжении тела результирующая составляющая силы в горизонтальном направлении будет равна $P - F_{\text{тр}}$, тогда ускорение тела связано с результирующей силой

зависимостью $a = (P - F_{\text{тр}})/m$. В процессе всего цикла испытаний определяются путь трения $S = L \cdot n_{\text{ц}}$ и суммарный износ образца и контртела. По причине того, что при испытаниях образцов неизбежно возникают вибрации установки, график совместного износа образца и контртела имеет вид сигнала незатухающих колебаний, поэтому автоматически строится аппроксимирующая кривая.

Испытания проводили при вращательном движении торца образца относительно закрепленного контртела. Нагрузка при испытаниях поддерживалась равной 50 Н, продолжительность испытаний – 100 км. Износ измеряли весовым методом с периодичностью: первые 10 км – каждый километр, далее – каждые 10 километров. В качестве контртел выступали: для сталей – материалы той же марки, термо- и механически обработанные так же, как и образцы стали при термической обработке; для чугунов в качестве контртел выступала сталь 45 с шероховатостью Ra 0,2 мкм и субшероховатостью $Rz_c = 31,72 \dots 32,1$ нм, $Sm_c = 34,00 \dots 34,97$ нм, термообработанная так же, как и образцы стали при термической обработке.

Для экспериментальной проверки теоретических выводов по оценке молекулярной и механической составляющих износа коэффициента трения и силы молекулярного (адгезионного) взаимодействия была изготовлена специальная экспериментальная установка. Установка имеет три режима испытаний. В режиме I определяется молекулярная составляющая коэффициента трения. В режиме II – механическая составляющая коэффициента трения. В режиме III – сила, необходимая для разрыва молекулярных связей. Молекулярный коэффициент трения на установке определяли по методике предложенной Н.М. Михиным. Данная методика основана на измерении значения силы, необходимой для вращения индентора, и радиус отпечатка. По заданным величинам нормальной нагрузки и радиус индентора определяются значения средних касательных напряжений, обусловленных межмолекулярными взаимодействиями и молекулярной составляющей коэффициента трения. Измерения проводились следующим образом. При включении электродвигателя осуществляется вращение шарового индентора в условиях действия на него нормальной к плоскости вращения силы. Так как вращение индентора происходит с постоянной скоростью, на панели управления установки отображается значение силы, необходимой для равномерного вращения индентора, после чего производятся вычисления по выражению

$$f_{\text{мол}} = 0,75 \frac{FR_0}{Nr_{\text{от}}},$$

где F – сила, необходимая для равномерного вращения индентора; R_0 – радиус индентора; N – нагрузка; $r_{\text{от}}$ – радиус отпечатка.

Так как механическая составляющая коэффициента трения равна такой доле молекулярной, какой будет равна механической составляющей от его молекулярной составляющей, то определение силы механического коэффициента трения основано на смещении внедренного индентора в образец при действии нормальных напряжения. Механическую составляющую коэффициента трения определяли из выражения

$$f_{\text{мех}} = 0,375 \frac{F}{\pi \cdot HB \cdot h_{\text{вн}} \cdot l_{\text{от}}} \cdot 10^{-6}.$$

Здесь F – сила, которую необходимо приложить, чтобы сдвинуть образец; $h_{\text{вн}}$ – глубина внедрения индентора; $l_{\text{от}}$ – ширина отпечатка индентора. Глубину внедрения и ширину отпечатка индентора определяли на микроскопе.

Силу молекулярных (адгезионных) связей определяли по зависимости

$$A = \frac{F \cdot S}{Sm_1 \cdot Sm_2} \cdot 10^{-3},$$

где F – сила, которую необходимо приложить, чтобы сдвинуть образец; A – сила адгезии, мН; S – номинальная площадь контакта; Sm_1 , Sm_2 – средний шаг неровностей шероховатости образца и контртела.

При определении A , силу F определяли следующим образом. Образец располагается в вертикальном или в горизонтальном положении. К образцу с усилием не более 10 Н. прижимается контртело, изготовленное из такого же материала, после чего нагрузка снимается. Посредством тензодатчика измеряется сила, необходимая для отрыва образца от контртела. При расположении образца в горизонтальном положении на контртело действует сила тяжести, прижимающая контртело к образцу и увеличивающая силу, необходимую для совершения разрыва молекулярной связи. При расположении образца вертикально на контртело действует сила тяжести, стремящаяся оторвать контртело от образца и уменьшающая силу, необходимую для разрыва молекулярной связи. В этой связи для достоверности результатов следует проводить испытания и в горизонтальном и вертикальном положении, и далее вычислять среднее значение силы F отрыва. При определении силы молекулярного взаимодействия шероховатость поверхностей исследуемых образцов не должна превышать $Ra=0,4$ мкм.

Для проведения обезводораживания образцов была разработана и изготовлена установка для термического наводораживания и высоковакуумного обезводораживания, общая функциональная схема которой была предложена Д.Н. Гаркуновым. Обезводораживание образцов проводилось по следующей технологии. Перед помещением в камеру образцы промывались бензином и четыреххлористым углеродом. После помещения образцов в камеру установки, камера герметизировалась и проводилась откачка воздуха из камеры до давления $1,8 \cdot 10^{-4}$ Па. При достижении вакуума в $1,8 \cdot 10^{-4}$ Па включалась электропечь и камера разогревалась до температуры 523 К. О начале десорбции водорода из образцов судили по падению давления в камере. При достижении вакуума $1,8 \cdot 10^{-4}$ Па при температуре 523 К. электропечь выключалась, и при достижении температуры в камере в 293 К. в нее запускался воздух.

Ионное имплантирование осуществлялось на установке «Везувий 3-М». В качестве имплантируемого элемента использовался кремний. Ионная имплантация проводилась с энергией ионов $E = 400$ кэВ; плотностью тока ионного пучка $j = 60$ мкА/см²; дозой облучения $Q = 1000$ мкКул /см²; углом наклона ионного пучка 7° .

Определение фазового состава, зернистости образцов и субшероховатости поверхности осуществляли на сканирующем зондовом микроскопе Femtосcan. Для определения структуры материала и других измерений был использован

вакуумный микроскоп Joel JSM-6610. Износ образцов по массе определялся на весах AMW (диапазон измерения 0-30 г., точность 1 мг., погрешность 0,5 мг.). Шероховатость и субшероховатость образцов определялась на профилографе Hommel Tester t8000. Концентрацию элементов в образцах определяли на атомно-эмиссионном спектрометре SpectroMAXx. Анализ содержания водорода в образцах в процессе исследования проводили в потоке аргона на анализаторе водорода RHEN-602. Микротвердость определяли на микротвердомере HVS-1000 методом восстановленного отпечатка. При испытаниях на износ в качестве смазочного материала применяли минеральное масло Ravenol 20w-50.

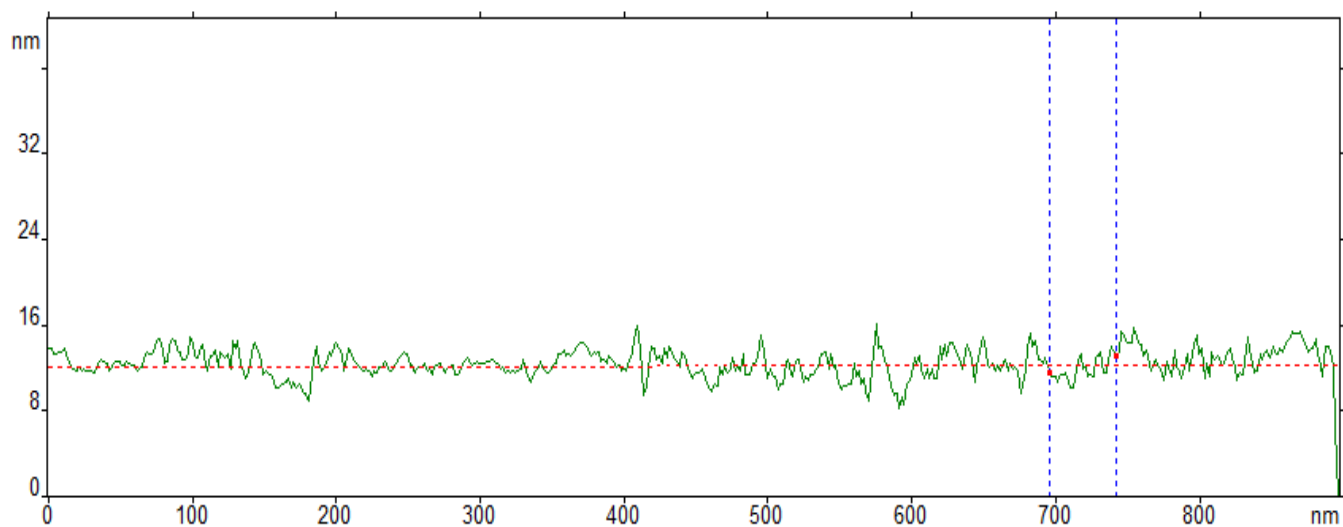
В третьей главе проводится анализ взаимосвязи субшероховатости с зернистостью материала и условиями механической обработки.

Анализ 300 профилограмм шероховатости поверхности деталей из различных материалов, обработанных различными методами, показал, что формируемая субшероховатость не зависит ни от методов, ни от режимов обработки, а определяется материалом. Это позволило проработать гипотезу о взаимосвязи субшероховатости поверхностей трения с зернистостью материала поверхностного слоя обрабатываемых деталей.

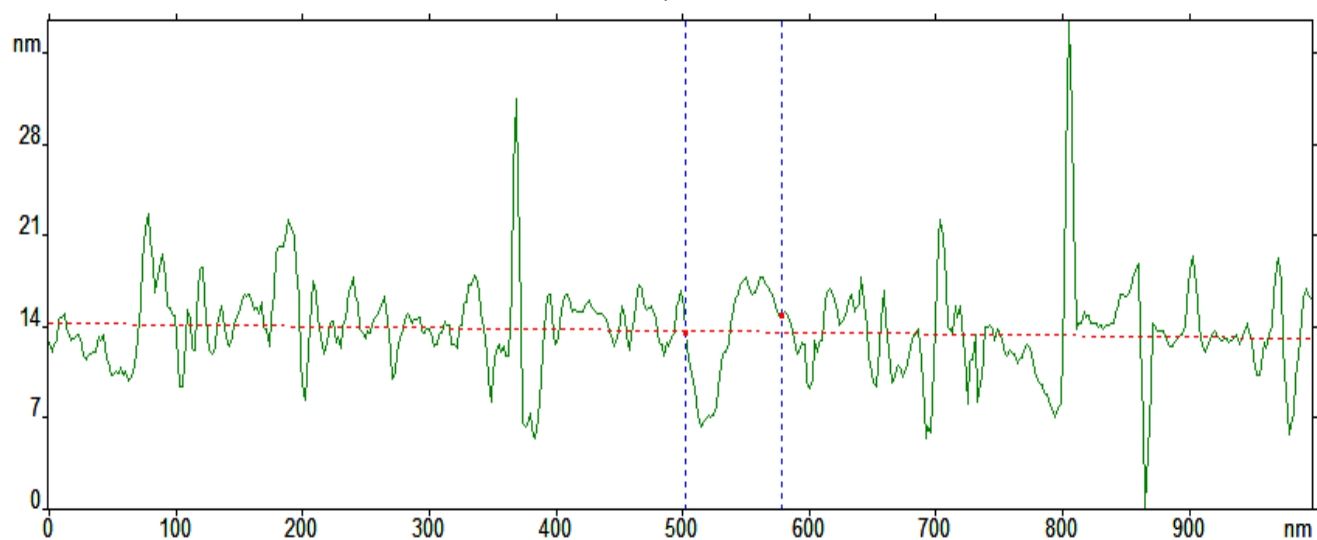
Перед сканированием образцов на сканирующем зондовом микроскопе с целью очищения поверхности от пленки окислов их поверхности обрабатывали полярным и неполярным растворителем. На каждой поверхности снимались профили субшероховатости в 8 сечениях на базовой длине $l=800$ нм. Расстояние между двумя соседними сечениями брали 6,25 нм. С целью повысить точность измерений и исключить влияния шероховатости при обработке результатов были применены преобразование Фурье и фильтр Винера. При анализе взаимосвязи субшероховатости и качества обработки значения, полученные в 8 сечениях, были усреднены, также произведен расчет дополнительных параметров, характеризующих профиль поверхности.

Согласно результатам исследования, для стали 45 относительная разность значений параметра Rz_c для каждого вида обработки не превышает 5% (*тонкое* $Rz_c = 31,72$ нм; *чистовое* $Rz_c = 32,1$ нм; *черновое* $Rz_c = 32,90$ нм). Близость значений высотных параметров субшероховатости Rz_c может говорить о незначительном влиянии вида обработки и, соответственно, фактической шероховатости на высоту профиля субшероховатости. Близкие значения шага профиля по средней линии (*тонкое* $Sm_c = 35,47$ нм; *чистовое* $Sm_c = 34,00$ нм; *черновое* $Sm_c = 31,45$ нм) позволяет утверждать, что шаг субшероховатости также нелинейно зависит от качества обработки. Фазовая структура образцов и профилограммы поверхности приведены на рис. 1. Средний шаг субшероховатости Sm_c для сталей 45, 40х и 40х13 соответственно равен 31,45; 28,67 и 21,92 нм. Вертикальные линии на рис. 1 в, г указывают зону с которой снят профиль поверхности (рис. 1 а, б). Средний размер зерна L_z стали 45 составил 33,06 нм; стали 40х – 27,47 нм; стали 40х13 – 44,72 нм.

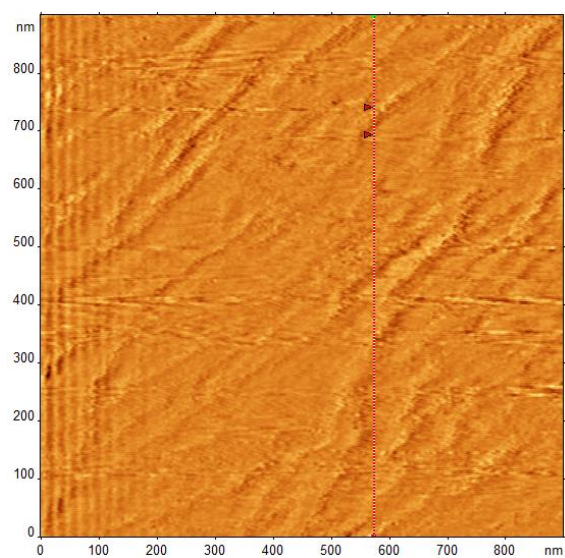
Обработка данных методами регрессионного анализа позволила получить следующие уравнения связи средних размера зерна и шага субшероховатости:



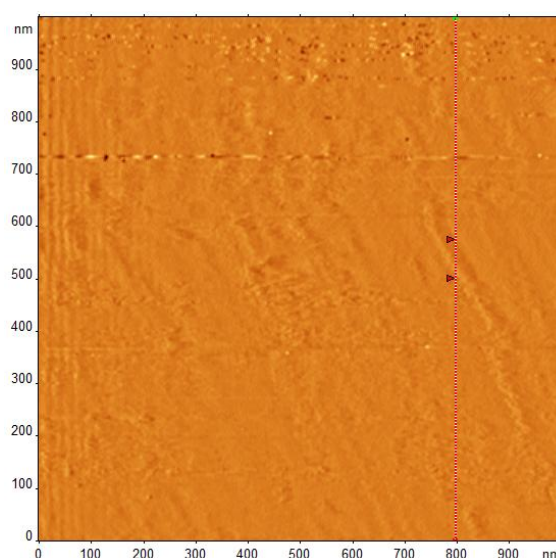
a)



б)



в)



г)

Рис. 1. Профилограммы субшероховатости и структура стали:
 45: а) профиль поверхности; в) структура;
 40х13: б) профиль поверхности; г) структура

для стали 45

$$L_3 = 28,48610 + 0,22977 \cdot e^{0,09651 \cdot S_{mc}}, \quad (1)$$

для стали 40х

$$L_3 = 27,4509 + 0,3689 \cdot e^{0,114113 \cdot S_{mc}}, \quad (2)$$

для стали 40х13

$$L_3 = 40,38740 + 0,01278 \cdot e^{0,12825 \cdot S_{mc}}. \quad (3)$$

Уравнение (1) объясняет 61,1% вариации L_3 (индекс корреляции $R_{SL}=0,7817$), уравнение (2) – 56,5% (индекс корреляции $R_{SL}=0,7729$), уравнение (3) – 53,5% (индекс корреляции $R_{SL}=0,7313$). Анализ уравнений регрессии (1), (2), (3) показывает на близость коэффициентов при S_{mc} , что позволит получить общее уравнение связи шага субшероховатости и среднего размера зерна материала мартенситных сталей

$$L_3 = 32,10810 + 0,20300 \cdot e^{0,11295 \cdot S_{mc}}.$$

Данное уравнение объясняет 57,7% вариации L_3 (индекс корреляции $R_{SL}=0,7945$).

Таким образом, установлена корреляция среднего шага субшероховатости поверхности и среднего размера зерна материала и экспериментально подтверждено, что субшероховатость формируется не технологией обработки поверхности детали, а зернистостью материала.

Четвертая глава посвящена построению математической модели молекулярно-механического изнашивания поверхностей трения на уровне субшероховатости с учетом наличия водорода.

Исходя из предположения, что в процессе трения, в зоне действия пластических деформаций, под действием избыточных давлений пленки окислов

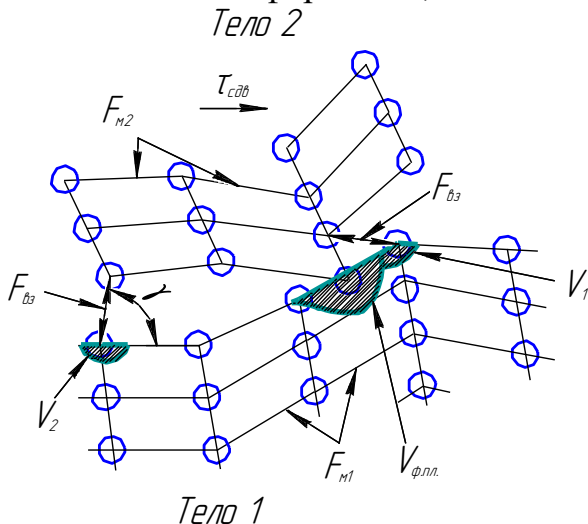


Рис. 2. Объемы, отделяемые при молекулярно-механическом износе

пластический характер деформаций. Многократное приложении нормальных и касательных нагрузок приводит к усталостному разрушению и образованию новых неровностей субшероховатости. Тогда, непрерывное образование новых неровностей субшероховатости при изнашивании поверхностей вызывает

разрушаются и происходит непосредственный контакт трущихся поверхностей (рис. 2), принималось, что в процессе трения будет меняться характер взаимодействия поверхностей. Предполагая, что смещение поверхностей перед каждым новым приложением нагрузки будет вызывать упругие и пластические деформации или срез ранее не контактирующих поверхностей, после многократных смещений и повторных приложений нагрузки все большая часть неровностей будет деформироваться упруго и все меньшая их часть будет иметь

упругие, пластические деформации или же срез вновь образовавшихся выступов. Таким образом, будут возникать как пластические, так и упругие деформации, а в некоторых случаях будет иметь место микрорезание выступов субшероховатости.

Предположим, что на уровне субшероховатости износ контактирующих поверхностей обусловлен усталостными свойствами. Тогда, механическая составляющая удельного износа

$$u = u_{nl} + u_{упр} + u_{ср} , \quad (4)$$

$$u_{nl} = \frac{V_{деф.пл}}{A_r L_{nl}} ,$$

$$u_{упр} = \frac{V_{деф.упр}}{A_r L_{упр}} ,$$

$$u_{ср} = \frac{V_{деф.ср}}{A_r L_{ср}} ,$$

где $V_{деф.пл}$, $V_{деф.упр}$, $V_{деф.ср}$ – объем деформируемого материала при пластическом, упругом контакте и при срезе; A_r - площадь фактического касания; $L_{ср}$ - путь трения.

Объем деформируемого материала при упругом, пластическом контакте или срезе определяется как сумма объемов деформируемых выступов на число циклов до разрушения:

$$V_{деф} = n_{ц} \sum V_{дефв} ,$$

тогда как суммарный объем деформируемых выступов определяется как объем единичного деформируемого выступа на число взаимодействующих выступов:

$$V_{деф.в.пл} = V_{ф.пл} \cdot n_{вз.пл} ,$$

$$V_{деф.в.упр} = V_{ф.упр} \cdot n_{вз.упр} ,$$

$$V_{деф.в.ср} = V_{ф.ср} \cdot n_{вз.ср} .$$

Число взаимодействий выступов субшероховатости поверхности с контртелом можно определить как отношение среднего распределения зерен мартенсита на поверхности детали (для закаленных мартенситных сталей) и относительного сближения трущихся поверхностей. Среднее распределение зерен мартенсита на поверхности, в первом приближении, определим как отношение числа зерен мартенсита на площади зерна аустенита к этой площади.

Относительное сближение определим как отношение абсолютного сближения на наибольший выступ субшероховатости. Абсолютное сближение будет равным разности наибольшего выступа субшероховатости и глубины внедрения выступа в контртело. При этом, на практике, наибольший выступ субшероховатости не будет превышать наибольшего размера зерна. В связи с тем, что, к примеру, мартенсит имеет тетрагональную объемно-центрированную сингонию и не выходит за пределы исходного зерна, наибольший размер зерна мартенсита будет меньше или равен диагонали зерна аустенита. Тогда абсолютное сближение определяется как разность диагонали зерна и глубины внедрения выступа субшероховатости в контртело. Тогда число взаимодействий выступов субшероховатости с контртелом для пластического контакта:

$$n_{вз.пл} = \frac{k_M l_{д.кр}}{S_3 h_{вн.пл}},$$

для упругого контакта:

$$n_{вз.упр} = \frac{k_M l_{д.кр}}{S_3 h_{вн.упр}},$$

число взаимодействий выступов субшероховатости подверженных срезу:

$$n_{вз.ср} = \frac{k_M l_{д.кр}}{S_3 h_{вн.ср}},$$

где k_M – среднее число зерен мартенсита; S_3 – площадь исходного зерна аустенита; $l_{д.кр}$ – длина диагонали кристалла; $h_{вн.пл}$, $h_{вн.упр}$, $h_{вн.ср}$ – глубина внедрения при пластической, упругой деформации и срезе.

Объем фактически деформируемого материала зависит от геометрии контактирующей поверхности, нагрузки и реакции опоры, и его можно смоделировать частью эллипсоида вращения, внедренного в поверхность. С учетом допущения, что выступы субшероховатости контртела не изнашиваются, объем фактически деформируемого материала при пластической деформации:

$$V_{ф.пл} = \pi \frac{\tau_{сдв} a b h_{вн.пл}^2}{4 \sigma_{ср} R_p^2} (2R_p - \frac{h_{вн.пл}}{3}),$$

при упругой деформации:

$$V_{ф.упр} = \pi \frac{\sigma_n a b h_{вн.упр}^2}{4 \sigma_{ср} R_p^2} (2R_p - \frac{h_{вн.упр}}{3}),$$

где $\tau_{сдв}$ – напряжение сдвига, МПа; $\sigma_{ср}$ – предел прочности, МПа; σ_n – нормальная нагрузка, МПа; a , b – наименьший и наибольший диаметры пятна контакта субшероховатости с контртелом, мкм; R_p – максимальная высота неровностей субшероховатости, мкм; $h_{вн.пл}$, $h_{вн.упр}$, $h_{вн.ср}$ – глубина внедрения при пластической, упругой деформации и срезе.

Так как при микрорезании число циклов до разрушения равно единице, то объем деформируемого материала будет зависеть только от геометрии поверхности и глубины внедрения субшероховатости в контртело:

$$V_{ф.ср} = \pi \frac{a b h_{вн.ср}^2}{4 R_p^2} (2R_p - \frac{h_{вн.ср}}{3}).$$

Таким образом, по выражению (4) представляется возможным определить механическую составляющую удельного износа на уровне субшероховатости.

Рассмотрим модель ювенильного контакта. Предположим, что в процессе трения под действием избыточных давлений, в зоне действия пластических деформаций, пленки окислов разрушаются, и происходит молекулярное взаимодействие контактирующих материалов. Принято считать, что адгезия – это результат стремления системы к уменьшению поверхностной энергии, тогда молекулярный износ формируют три энергии: внутренняя энергия взаимодействия молекул тела, потенциальная энергия адгезионного взаимодействия (потенциальная энергия свободных связей) и энергия взаимодействия контртела.

На границе двух фаз находятся некомпенсированные связи, которые направлены в сторону менее плотной среды. Эти связи испытывают избыточное силовое воздействие со стороны частиц твердого тела, которое стремится втянуть частицы поверхностного слоя внутрь более плотной среды. Адгезия обусловлена различного типа взаимодействиями, наиболее универсальными и часто встречающимися из которых являются силы дисперсионного взаимодействия или силы Лондона. Согласно силам Лондона энергия связи обратно пропорциональна шестой степени расстояния между диполями, тогда энергию адгезионного взаимодействия можно записать

$$F_{\text{вз}} = \frac{A_H w^2}{z_0^2 v_1 v_2}, \quad (5)$$

где A_H – константа Гамакера; v_1, v_2 – число некомпенсированных связей тела и контртела; w – число некомпенсированных связей молекулы, образовавших адгезионную связь; z_0 – компенсированное расстояние, на котором энергия взаимодействия равна нулю $F_{\text{нрм}} = F_{\text{омм}}$.

Адгезионное взаимодействие осуществимо, когда свободная молекулярная связь активирована, поэтому константа Гамакера в выражении (5), по своей сути, характеризует энергию активации адгезии. Молекулярный износ осуществим в случае, когда энергия взаимодействия молекул контртела $F_{\text{вз.к}}$ больше энергии адгезионного взаимодействия $F_{\text{вз}}$ и энергии взаимодействия молекул тела $F_{\text{вз.т}}$. Приведенное неравенство, по своей сути, является необходимым условием осуществления молекулярного износа тела или контртела. Проведя преобразования неравенства, получаем параметр, характеризующий условия осуществления адгезионного износа

$$A = \frac{F_{\text{вз}} - F_{\text{вз.т}}}{F_{\text{вз.к}}}.$$

При значениях параметра $A \leq 0$ будет осуществляться молекулярный износ контртела, при $A > 0$ – молекулярный износ тела. В некоторых случаях, при условии, что $F_{\text{вз}} > F_{\text{вз.т}}$ и $F_{\text{вз}} > F_{\text{вз.к}}$ возможен как износ тела, так и контртела.

Энергия взаимодействия молекул твердых тел зависит от числа связей единичной молекулы, находящейся на границе раздела фаз, и энергии межмолекулярного взаимодействия каждой из этих связей

$$\begin{aligned} F_{\text{вз.т}} &= k_m F_{\text{вз.м.т}}, \\ F_{\text{вз.к}} &= k_k F_{\text{вз.м.к}}, \end{aligned}$$

где k_m, k_k – число связей тела и контртела; $F_{\text{вз.м.т}}, F_{\text{вз.м.к}}$ – энергия взаимодействия единичной молекулы внутри тела и контртела.

Под числом связей понимается число соседних молекул, оказывающих воздействие на молекулу, образовавшую адгезионную связь. Для кристаллических тел число связей можно определить по форме, размерам и параметрам кристаллической решетки. Так как молекулы тела стремятся занять положение, соответствующее минимуму их потенциальной энергии, тогда энергию взаимодействия единичной молекулы можно описать с помощью потенциала Леннард-Джонса.

Молекулярный износ, в первом приближении, определялся как износ, осуществляемый под действием напряжения сдвига $\tau_{сдв}$ на поверхности, характеризуемой геометрией χ_a отнесенное к параметру, характеризующему условие осуществление молекулярного износа A на число этих параметров $n_{адз}$. После подстановки получим

$$m = \frac{\tau_{сдв} k_k F_{вз.м.к} \chi_a}{(wF_{вз} - k_m F_{вз.м.м}) n_{адз}},$$

где $\tau_{сдв}$ - напряжение сдвига; $n_{адз}$ - число образовавшихся молекулярных (адгезионных) связей (число систем A); χ_a - параметр, характеризующий геометрию молекулярного вырыва.

С целью упрощения системы принималось, что контртело не подвергается износу и энергия адгезии не зависит от числа некомпенсированных связей образовавших адгезионную, тогда

$$m = \frac{\tau_{сдв} \chi_a}{(F_{вз} - k_m F_{вз.м.м}) n_{адз}}.$$

Так как адгезия осуществляется на некотором, пусть и минимальном, расстоянии между взаимодействующими телами можно допустить, что число адгезионных связей не зависит от фактической площади касания, а зависит от номинальной площади и геометрии поверхности. Параметр χ_a является функцией внутренней энергии тела, напряжения сдвига и параметров наноггеометрии поверхности. Если молекулярный износ происходит близко к границе зерна или месту скопления дислокаций, тогда определение параметра χ_a представляет трудно решаемую задачу, так как в таком случае требуется учесть координаты и глубину залегания дефекта.

Общая величина молекулярного износа в жизненном цикле изделия напрямую зависит от числа циклов взаимодействий поверхностей ($n_{ц.а}$). Тогда, представляет интерес определение молекулярного (адгезионного) износа при единичном контакте поверхностей ($n_{ц.а} = 1$).

Учитывая, что для возникновения молекулярной (адгезионной) связи предпочтительно, чтобы деформация была пластической, и известно, что при пластической деформации дислокации перемещаются к краю зерна, тогда в начальный момент трения молекулярный износ будет больше, чем при установившемся режиме, так как распределение дислокаций по зерну будет носить случайный характер. Атомы кристаллических решеток сопряженных поверхностей, расположенные близко к зоне пластических деформаций и образовавшие молекулярную связь, могут привести к увеличению отделяемого объема V_1 в процессе изнашивания. Возможны случаи, когда неровности трущихся поверхностей оказываются на некотором расстоянии друг от друга, достаточном, чтобы между ними образовалась молекулярная связь и при этом на некотором удалении от зоны фактического контакта. В этом случае также возможно увеличение отделяемого объема V_2 при износе. Изнашивание вследствие разрыва молекулярных связей, образовавшихся между трущимися телами, и отделение части объема тела принято называть адгезионным износом. В

таким случае объем отделяемый при адгезионном износе, если такой произошел, можно определить из формы и характеристик кристаллической решетки, а также физико-механических свойств зерен материала.

Предполагая, что при разрыве такой связи произошел износ тела 1 (рис. 2) принимаем, что тело 2 обладает максимально возможной энергией межмолекулярного взаимодействия $F_{м.2} \Rightarrow \max$ и адгезионный износ данного тела не происходит. Предположим, что объем, отделяемый при адгезионном износе V_a определяется энергией взаимодействия атомов $F_{м.1}$ в теле 1. Каждый атом в решетке взаимодействует со всеми соседними атомами. Стальные детали, имеющие мартенситную структуру, обладают тетрагональной объемно-центрированной сингонией. Учитывая, что решетка имеет четкую структуру можно предположить, что сопротивление отделению объемов тела при адгезионном износе оказывается по векторам, направленным от атома, образовавшего адгезионную связь, в направлении соседних атомов и далее, и чья энергия межмолекулярного взаимодействия $F_{м.1}$ меньше энергии адгезионной связи $F_{сз}$. Тогда, зная направления и длины векторов, можно определить объем фигуры, ограниченной векторами l_i , как сумму тетраэдров, образованных векторами. Объем фигуры ограниченной векторами определяли по выражению

$$V_{a.m} = 10^{16} \left\{ \frac{1}{6\sqrt{2}} [(l_2 + l_4)(l_1 l_6 + l_3 l_8) + \frac{1}{12} (l_7(l_5 + l_2)(l_6 + l_8) + l_9(l_4 + l_5)(l_6 + l_8))] \right\}.$$

Объем фигуры, ограниченной векторами, равен объему отделяемому при адгезионном износе, расположенному на некотором отдалении от зоны действия деформаций $V_a = V_2$. Приняв некоторые допущения, можно говорить об эквивалентности адгезионного износа в зоне действия деформаций и объема, ограниченного векторами $V_a = V_1$. Тогда объемы, отделяемые при молекулярном износе мартенситных сталей за один цикл $V = 2V_a$.

Как известно, в мартенситных сталях имеется остаточный аустенит в объеме не более 10% от структуры материала. Таким образом, целесообразно учитывать аустенитную структурную составляющую при расчете молекулярного (адгезионного) износа.

$$V_{a.a} = \frac{10^{16}}{12} [l_{10}(l_1 + l_9)(l_8 + l_2) + l_{13}(l_7 + l_9)(l_8 + l_6) + l_{12}(l_5 + l_9)(l_6 + l_4) + l_{11}(l_3 + l_9)(l_4 + l_2)].$$

Очевидно, что векторы l_i , расположенные на границе двух фаз, имеют меньшее число соседних атомов и, следовательно, большую потенциальную энергию, чем векторы, направленные от поверхности вглубь тела. Учитывая, что реальные поверхности имеют неровности, такие как шероховатость и субшероховатость, молекулярная (адгезионная) связь $F_{сз}$ образуется на поверхностях, расположенных по отношению друг к другу под некоторым углом γ_a . Величина угла γ_a будет влиять на длину вектора l_i , так как атомы тела, расположенные ближе к вершине неровности, легче поддадутся отрыву вследствие большей потенциальной энергии. Кроме того, атомы тела расположенные ближе к вершине, имеют большую вероятность образовать молекулярную связь с контртелом.

Атом находящейся внутри объема тела, взаимодействует с большим числом соседних атомов k_k , чем атом, расположенный на поверхности тела и имеющий определенное число некомпенсированных связей v_1 . Причем общее число возможных соседних атомов $k = k_k + v_1$ определяется из кристаллической решетки. Тогда выражение для расчета длин векторов l , расположенных на поверхности:

$$l_i = \left| \frac{F_{\text{вз}}}{F_M G} \operatorname{tg}(F_{\text{вз}}, F_M) \right|.$$

Выражение для расчета длин векторов направленных от поверхности в глубину тела должно учитывать большее число соседних атомов:

$$l_i = \left| \frac{v_1 F_{\text{вз}}}{k F_M G} \operatorname{tg}(F_{\text{вз}}, F_M) \right|,$$

где G – модуль сдвига; k – возможное число соседних атомов; $k_k = k - v_1$ – реальное число соседних атомов.

Согласно полученным выражениям, с увеличением числа возможных соседних атомов износ уменьшается (рис. 3), что говорит о том, что чем сложнее элементарная ячейка и чем меньше расстояние между атомами, тем она менее подвержена молекулярному износу.

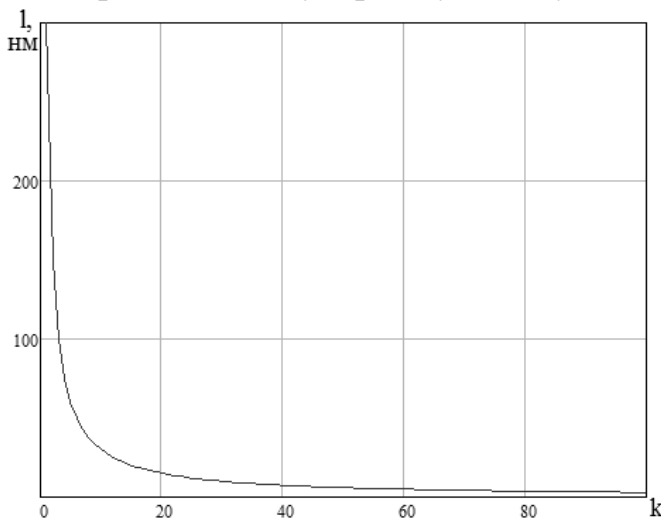


Рис. 3 Зависимость длины вектора l от числа возможных соседних атомов k

Учитывая, что в мартенситных сталях остаточный аустенит составляет не более 10% можно предположить менее значительное влияние аустенитной структуры на износ, чем мартенситной

$$V_a = 0,8V_{a.m} + 0,1V_{a.a}.$$

Определить молекулярную составляющую удельного износа можно из выражения

$$s = \frac{V_a}{A_r L}. \quad (6)$$

Удельный износ с учетом механической (4) и молекулярной (6) составляющих:

$$i = (u + s)h_2. \quad (7)$$

Здесь h_2 – коэффициент, учитывающий влияние водорода и водородного изнашивания в целом на удельный износ. Для приближенных инженерных расчетов коэффициент h_2 можно принять равным $h_2 = 1$.

Таким образом, получена теоретическая модель для расчета молекулярно-механического износа поверхностей трения, учитывающая наличие субшероховатости поверхностей трения, внутреннюю энергию взаимодействия молекул тела, кристаллическую структуру и деформации при контактом взаимодействии поверхностей.

В пятой главе приведены результаты и анализ экспериментальных исследований. Приведена технология, направленная на уменьшение износа

поверхностей трения в соответствии с предложенной теоретической моделью. Описаны результаты расчетов по теоретической модели и их сравнение с результатами экспериментальных исследований.

Анализ полученных теоретических зависимостей показывает, что износ поверхностей трения в условиях водородного изнашивания зависит от зернистости материала поверхностного слоя. В начальный момент трения, в период приработки, происходит смятие выступов шероховатости и образование площадок контакта, и далее износ осуществляется по субшероховатости. В процессе трения зерна деформируются пластически и упруго. Ранее установлено, что средний шаг субшероховатости поверхности коррелирует с средним размером зерна материала. Следовательно, уменьшить значения параметров субшероховатости возможно путем уменьшения размеров зерен. Размер зерен возможно уменьшить, например, путем термической обработки материалов до мартенситной структуры. Учитывая это, для технологического повышения износостойкости таких пар трения необходимо уменьшать зернистость поверхностного слоя, уменьшать содержание биографического водорода, повысить сопротивляемость материала к проникновению эксплуатационного водорода.

С целью уменьшения водородного износа была проведена комплексная функционально-ориентированная обработка (КО), включающая термическую обработку (ТО), высоковакуумный отжиг (ВО) и ионную имплантацию (ИМ). В качестве имплантируемого элемента рассматривались элементы, обладающие высокой твердостью, способные создавать карбиды или твердые фазы внедрения, режимы имплантации которых известны или возможно получить доступными методами. Так, для проведения имплантации, были выбраны материалы: марганец, кремний, бор.

Предварительные испытания на износ образцов после имплантации различными элементами показали, что образцы, имплантированные марганцем, изнашиваются сопоставимо с обезводороженными образцами. Износ образца стали 45 ($R_a=0,2$ мкм, $L=10$ км.) после обезводороживания составил 54 мг, после имплантации марганцем – 53 мг. По этой причине от имплантации марганца решено было отказаться. Износ образцов, имплантированных бором (34 мг.), был незначительно меньше, чем у образцов, имплантированных кремнием (37 мг.). Однако, анализ износа контртела показал, что при имплантации бора суммарный износ образца и контртела на 41 мкм. больше, чем при имплантации кремния. Суммарный износ при имплантации образца бором – 104 мкм., при имплантации образца кремнием – 63 мкм. Очевидно, что бор интенсивнее изнашивает контртело, чем кремний, таким образом, по итогам предварительных испытаний было принято решение проводить имплантацию кремнием.

После проведения функционально-ориентированной обработки (термообработка, высоковакуумный отжиг, ионная имплантация кремнием), с целью исследования структуры поверхности, было проведено травление поверхности образцов-свидетелей в азотной кислоте, которое позволило установить наличие на поверхности пятен, формой близкой к округлой (рис. 4а). Предположение о природе пятен, как мест скопления кремния в дефектах

кристаллической решетки было отвергнуто после проведения спектрального анализа образцов до и после комплексной функционально-ориентированной обработки. Соотношение химических элементов и, в частности, кремния, в образцах изменилось не существенно.

Средний диаметр пятен на поверхности находится в пределах 20...25 мкм. Для определения глубины образовавшейся структуры было проведено исследование торца образцов (рис. 4б) на микроскопе Joel JSM-6610. Было установлено, что в поверхностном

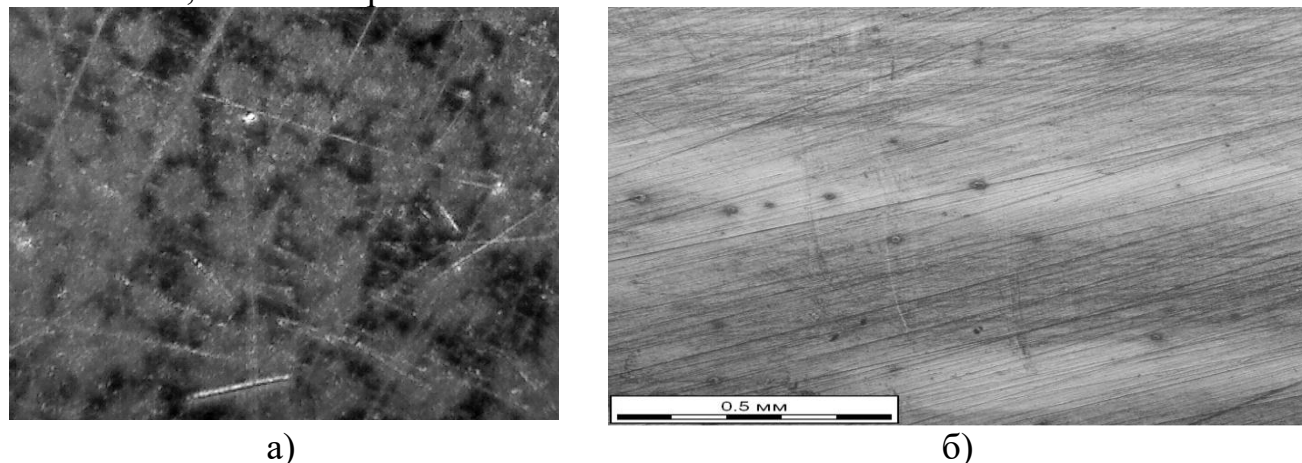


Рис. 4. Изображение стали после комплексной функционально-ориентированной обработки:

а) поверхность; б) торец

слое присутствуют светлые полосы. Цвет полос неоднороден, на них встречаются тонкие включения более темного цвета. Полосы, большей частью, расположены параллельно относительно поверхности образца. При этом, чем ближе к поверхности образца, тем плотность данных полос возрастает. Отсюда можно сделать вывод, что образовавшаяся структура имеет форму вытянутого диска. Наибольшая глубина залегания полос 655...702 мкм. Ширина полос на наибольшей глубине залегания не превышает 47 мкм.

Для определения типа структуры было проведено травление различными химическими реактивами. Травление 4 %-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте показало, что образованная структура имеет карбидную основу. Микротвердость полос составила $H_{\square}=56,76$, основная (мартенситная) структура материала имела микротвердость $H_{\square}=45,37$.

Анализ профилограмм субшероховатости образцов после проведения комплексной функционально-ориентированной обработки показал, что средние значения параметра Rz_c для каждого материала уменьшилось. Так, для стали 45 значение неровности профиля субшероховатости по 10 точкам равно $Rz_{c\ 45} = 30,12$ нм. Для сталей 40х и 40х13 соответственно – $Rz_{c\ 40x} = 13,73$ нм, $Rz_{c\ 40x13} = 15,08$ нм. Значения параметра шага субшероховатости увеличилось для всех материалов и имело значения $Sm_{c\ 45} = 39,91$ нм, $Sm_{c\ 40x} = 32,56$ нм, $Sm_{c\ 40x13} = 24,67$ нм. Уменьшение высотного параметра и в то же время увеличение шагового параметра субшероховатости позволяет утверждать, что при проведении комплексной функционально-ориентированной обработки межзеренные границы и поверхностные дефекты заполняются внедряемым элементом, что в целом говорит о «выглаживании» профиля субшероховатости.

Анализ по параметрам шероховатости показал, что можно говорить о незначительном изменении геометрии поверхностного слоя в целом. Параметр шероховатости Ra изменился незначительно, параметр шероховатости Sm при проведении комплексной функционально-ориентированной обработки уменьшился в 2,5 раза по сравнению с термически обработанным образцом. Такие результаты говорят о том, что при проведении данных технологических операций требуемое качество поверхностного слоя не ухудшается, следовательно, последующей механической обработки не потребуются.

Одной из причин эффективности предложенной технологии может быть тот факт, что при высоковакуумном отжиге в поверхностном слое образца снижается количество биографического водорода. В то же время при ионной имплантации поверхностный слой насыщается ионами кремния, часть которых может заполнять дефекты кристаллической решетки, такие как вакансии, дислокации и межзеренное пространство, что может являться причиной увеличения параметра шага субшероховатости по средней линии Sm_c . Часть ионов может образовать карбиды в поверхностном слое, что приводит к уменьшению параметра Sm шероховатости. Часть ионов может оседать в междоузлиях решетки, создавая твердый раствор внедрения. Все это может препятствовать атомарному водороду, выделившемуся из смазочного материала или водородной среды, интенсивно проникать в поверхностный слой и концентрироваться в дефектах и, как следствие, снижать водородное изнашивание и водородное охрупчивание деталей.

Для проверки предположения о снижении концентрации водорода в поверхностном слое было произведено измерение содержания водорода в образцах. При измерении количества водорода установлено, что содержание биографического водорода в образцах после ТО+высоковакуумный отжиг (6,3 ppm) и комплексной функционально-ориентированной обработки (6,5 ppm) практически неизменно, но снизилось по сравнению с только термически обработанным образцом (7,4 ppm). Так, содержание водорода в этих образцах ниже, чем в образцах после термической обработки. В целом это говорит об эффективности метода высоковакуумного отжига для снижения концентрации биографического водорода в поверхностном слое. Наряду с этим после испытаний на износ содержание водорода в образцах после комплексной функционально-ориентированной обработки снизилось (5,4 ppm), а после ТО+высоковакуумный отжиг увеличилось (7,3 ppm) и достигло значений образца подверженного только термической обработке (7,1 ppm). Это может являться следствием того, что модифицированный поверхностный слой снижает диффузию водорода из смазывающего материала или миграцию биографического водорода из глубины детали в поверхностный слой.

Испытания термически обработанных образцов на износ показали, что наиболее износостойкими оказались образцы, обработанные до шероховатости $Ra = 0,2$ мкм. Стали 40х и 40х13 в целом показали большую износостойкость по сравнению со сталью 45. При этом наименее изношенным образцом был образец, изготовленный из стали 40х13, обработанный до $Ra = 0,2$ мкм, и имеющий субшероховатость $Rz_c = 17,21$ нм, $Sm_c = 22,14$ нм. В результате испытаний на износ

образцов после различных методов обработки наименее изнашивались образцы после комплексной функционально-ориентированной обработки (рис. 5). Среди

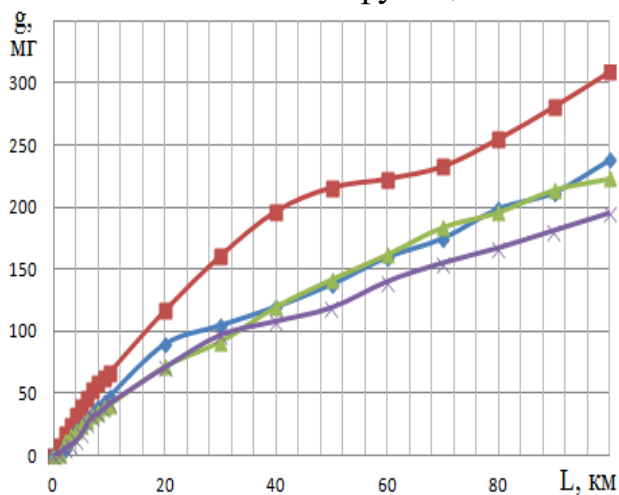


Рис. 5. Износ по массе образца из стали 40х, $Ra=0,4$ мкм

■ - ТО; ◆ - ТО+ВО; ▲ - ТО+ИМ; ✖ - КО

чугунов наибольшую изношенность показал термически обработанный образец, изготовленный из чугуна А-ВПЧ. Потеря массы чугунного образца на сотом километре пути трения, по сравнению со стальными образцами, меньше чем у термообработанного образца из стали 45 с шероховатостью $Ra=1,6$ мкм.

Анализ по материалу показал, что наименьшему износу оказалась подвержена сталь 40х13, что можно объяснить тем, что сталь 40х13 является хромистой сталью с высоким содержанием хрома, и, как известно,

хром увеличивает износостойкость материалов, в том числе и при водородном изнашивании. Наиболее износостойким был образец из стали 40х13 с шероховатостью $Ra=0,4$ мкм и субшероховатостью $Rz_{с\ 40х13}=15,08$ нм, $Sm_{с40х13}=24,67$ нм, после комплексной функционально-ориентированной обработки, износившейся на 127 мг. Среди чугунов наименьший износ имел чугун А-ВПЧ после термообработки и хромирования. При этом значения массового износа образцов из чугуна А-ХМ и А-ВПЧ после термообработки и хромирования – близки, что хорошо видно из кривых износа. Однако, по сравнению со стальными образцами, подвергнутыми комплексной функционально-ориентированной обработке (при сопоставлении образцов с близкой исходной шероховатостью) износ чугунов был на порядок больше. Таким образом, наибольшей износостойкостью, в данных условиях испытаний, обладают образцы, изготовленные из стали 40х13, обработанные до шероховатости $Ra=0,2...0,4$ мкм, с последующей функционально-ориентированной обработкой, имеющие субшероховатость, $Rz_{с\ 40х13}=15,0...16,0$ нм, $Sm_{с\ 40х13}=24,5...24,7$ нм.

Проверить адекватность предложенных теоретических зависимостей можно, сопоставив их с результатами эксплуатационных испытаний. При расчете теоретической модели были использованы следующие значения параметров субшероховатости, полученные с профилограмм: шаг субшероховатости по средней линии; высота неровностей субшероховатости по 10 точкам. Учитывая, полученные ранее уравнения связи представляется возможным получение значений приведенных выше параметров субшероховатости, исходя из зернистости материала. Также в расчетах используются следующие характеристики зерен материала поверхностного слоя: среднее число зерен на единице площади; площадь исходного зерна; наибольший размер зерна на единице площади; плотность зерен на единице площади; средние размеры зерен в продольном и поперечном направлениях.

Проведенный расчет удельного износа образцов по эмпирическим данным и по теоретическим зависимостям (7) показал, что в начальный момент трения значения экспериментальных кривых и модели показывают значительные различия, тогда как при увеличении пути трения значения модели и эксперимента сближаются (рис. 6). Из этого можно сделать вывод, что теоретические модели в

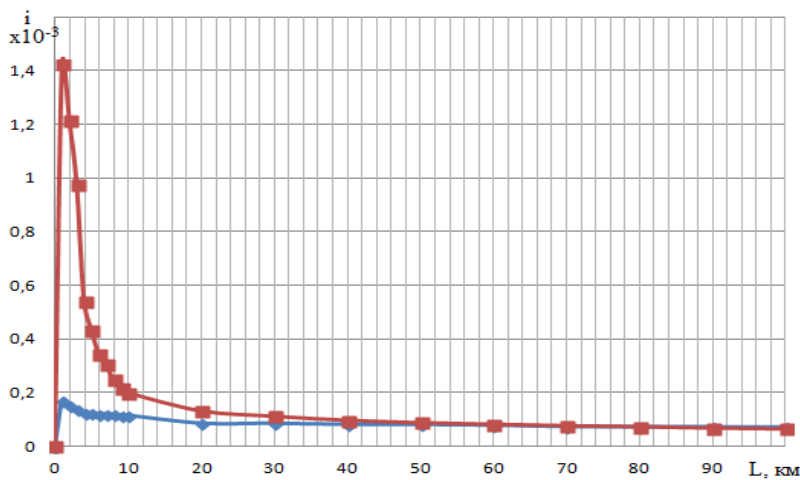


Рис. 6. Кривые удельного износа стали 40x13 (ТО, $Ra=0,4$ мкм.)

◆ - эмпирическая; ■ - теоретическая

период приработки дают большую погрешность, тогда как в период установившегося износа сходимость кривых является приемлемой. Согласно полученным результатам, расхождение эмпирических и теоретических кривых удельного износа в период установившегося износа для стали 45 не превышает 28%, для стали 40х – 36 %, для стали 40x13 – 38%.

С целью определения влияния проведенных технологических операций на износ контртела было произведено измерение суммарного износа пар трения после 100 км испытаний. В качестве контртел выступали: для сталей – материалы той же марки, термо- и механически обработанные так же, как и образцы стали при термической обработке; для чугунов в качестве контртел выступала сталь 45 с шероховатостью $Ra=0,2$ мкм и субшероховатостью $Rz_c=31,72...32,1$ нм, $Sm_c=34,00...34,97$ нм, термообработанная так же, как и образцы стали при термической обработке. Наименьший суммарный износ был у пары трения сталь 40x13 ($Ra=0,4$ мкм, $Rz_c=15,08$ нм, $Sm_c=24,67$ нм, КО) – сталь 40x13 ($Ra=0,4$ мкм $Rz_c=15,84$ нм, $Sm_c=24,19$ нм, ТО); наибольший износ у пары трения чугун А-ВПЧ ($Ra=0,5$ мкм, ТО) – сталь 45 ($Ra=0,2$ мкм, $Rz_c=31,98$ нм, $Sm_c=34,17$ нм, ТО). Результаты суммарного износа показывают, что проведение комплексной функционально-ориентированной обработки не сказывается критически на износе контртела.

Анализируя результаты испытаний образцов после ТО и ТО+ВО можно эмпирически определить коэффициент, учитывающий влияние водородного изнашивания на износ в целом и водорода в частности. Его определяли как отношение потери массы образца после обезводораживания к потере массы образца до обезводораживания на каждом участке пути трения. Так, для стали 45 коэффициент водорода находится в пределах 1,08...1,31; для стали 40х – 0,85...1,92; для стали 40x13 – 1,01...1,61. Средние значения коэффициента для стали 45 – 1,194; для стали 40х – 1,333; для стали 40x13 – 1,155.

Анализ структуры образцов после испытаний на износ показал, что основной структурой всех стальных образцов остался мартенсит. Проведенный анализ химического состава поверхностей трения показал, что химический анализ образцов, подверженных комплексной обработке, после испытаний на износ

изменился незначительно. Незначительные изменения химического состава можно объяснить процессами, происходящими в зоне трения при наличии смазывающего материала. Анализ профилограмм субшероховатости образцов после испытаний на износ позволяет утверждать, что средние значения параметров субшероховатости Rz_c и Sm_c остались в тех же пределах, что и до испытаний. Так, среднее значение шага субшероховатости Sm_c составило для сталей 45, 40х и 40х13 (ТО) соответственно 32,19, 27,16 и 22,14 нм.

Таким образом, теоретически обосновано, что детали, имеющие мелкозернистую структуру, имеют наибольшую износостойкость по сравнению с деталями, обладающими крупнозернистыми структурами. Для технологического повышения износостойкости пар трения, работающих в водородной среде, необходимо уменьшать зернистость поверхностного слоя, что возможно путем термической обработки, уменьшать содержание биографического водорода, что возможно путем высоковакуумного отжига, повышать сопротивляемость материала к проникновению эксплуатационного водорода, что осуществимо введением в поверхностный слой ионов кремния, применять на практике детали с заданными параметрами субшероховатости поверхности $Rz_c = 15,0 \dots 16,0$ нм, $Sm_c = 24,5 \dots 24,7$ нм. Совокупность описанных выше методов можно охарактеризовать как комплексная функционально-ориентированная обработка поверхностей трения. В качестве материалов, подверженных водородному изнашиванию целесообразно использовать хромистую сталь 40х13 с параметрами субшероховатости поверхности $Rz_{c\ 40х13} = 15,08$ нм, $Sm_{c\ 40х13} = 24,67$ нм, с последующей функционально-ориентированной обработкой. Полученные эмпирические коэффициенты, учитывающие наличие биографического водорода, могут быть использованы в теоретических исследованиях и инженерных расчетах.

В шестой главе даны рекомендации по использованию положительных результатов исследования, приведены перспективы дальнейших исследований и приведен расчет экономического эффекта от применения результатов исследования в промышленности. Результаты теоретических и экспериментальных исследований могут быть использованы при инженерных расчетах износа поверхностей трения. Отдельные результаты диссертационного исследования могут быть использованы на промышленных предприятиях, в учебных и научных организациях. Использование результатов исследования является актуальным для узлов трения следующих машин и оборудования: нефтепроводы, коробки передач, газотурбинное оборудование, поршневые кольца двигателей внутреннего сгорания, насосы для перекачивания нефтяных вязких, речной и морской транспорт, аэрокосмическая отрасль, приборостроение. Основная экономия денежных средств достигается за счет увеличения ресурса работы узлов трения. Годовой экономический эффект от внедрения результатов исследования на промышленных предприятиях, производящих поршневые кольца двигателей внутреннего сгорания даст экономический эффект более 18,5 млн. руб. Годовой экономический эффект внедрения результатов исследования на предприятиях, производящих битумные насосы составил более 2,9 млн. руб., что подтверждается соответствующими актами.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, заключающиеся в разработке теории изнашивания субшероховатости поверхностей трения в водородсодержащих средах и комплексной технологии, обеспечивающей повышение износостойкости деталей, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны, заключающийся в повышении долговечности узлов трения, работающих в водородсодержащих средах.

1. Установлена взаимосвязь субшероховатости поверхности с зернистостью материала, которая показывает, что основной вклад в формирование субшероховатости вносится не технологией обработки поверхности детали, а ее материалом – зернистостью. На основе проведенного регрессионного и корреляционного анализов получены уравнения связи средних шага субшероховатости и размера зерна материала.

2. Предложена физическая картина изнашивания субшероховатости поверхности трения с учетом водородной среды. Доработана модель молекулярно-механического изнашивания поверхностей трения на уровне субшероховатости, с учетом наличия водорода.

3. Разработана математическая модель механического изнашивания поверхностей трения на уровне субшероховатости, учитывающая кристаллическую структуру материала, на основе усталостной теории изнашивания, с учетом пластического и упругого контакта, а также среза.

4. Разработана математическая модель молекулярного изнашивания поверхностей трения на уровне субшероховатости, на основе адгезионной теории, с применением положений теории дисперсионного взаимодействия, учитывающая кристаллическую структуру материала, нанogeометрию поверхностей трения и силу адгезионного взаимодействия.

5. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили установить, что в процессе приработки происходит изнашивание выступов шероховатости, в результате чего в контакт вступают субшероховатость и в процессе установившегося износа происходят их упругие и пластические деформации и износ.

6. На базе полученных математических зависимостей разработана комплексная функционально-ориентированная технология, обеспечивающая повышение износостойкости поверхностей трения, работающих в водородных средах, за счет:

а) уменьшения зернистости поверхностного слоя материала (термообработка);

б) обезводороживания поверхностного межзеренного пространства (высоковакуумный отжиг);

в) уменьшения попадания водорода из водородной среды в межзеренное пространство поверхности трения при эксплуатации (ионная имплантация).

7. Экспериментальные исследования показали, что полученные теоретические модели износа адекватны для процесса установившегося изнашивания и неадекватны для процесса приработки. Поэтому для определения

износа поверхностей трения для условий приработки целесообразно использовать существующие теоретические модели изнашивания шероховатости поверхности. А для процесса установившегося износа - полученные в работе математические модели изнашивания субшероховатости поверхности. Это говорит о том, что для обеспечения износостойкости на поверхности трения деталей наряду с ранее предложенными параметрами шероховатости R_a , S_m и t_p – необходимо проставлять и стандартизованный параметр s (шаг между вершинами локальных выступов), который определяется зернистостью материала.

8. Разработана и изготовлена технологическая установка для термического наводороживания и высоковакуумного отжига, позволяющая проводить наводороживание и обезводороживание экспериментальных образцов и промышленных деталей.

9. Разработана и изготовлена экспериментальная установка, оснащенная датчиками повышенной точности, позволяющая проводить автоматизированные испытания на износ при вращательном или возвратно-поступательном движении образца относительно контртела при наличии или отсутствии смазочного материала.

10. Разработана и изготовлена установка для определения силы молекулярного взаимодействия, а также для определения механического и молекулярного коэффициентов трения.

11. Результаты проведенного исследования апробированы на промышленных предприятиях: ОАО «Клинцовский завод поршневых колец», ООО «ПКК «Битнас», ООО «Биттех». Внедрение предложенных решений позволило получить экономический эффект за счет повышения долговечности пар трения, работающих в водородсодержащих средах, свыше 2,9 млн руб.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и в международных рецензируемых изданиях

1. Шалыгин, М.Г. Объемные потери в шестеренных насосах с учетом влияния температуры / М.Г. Шалыгин // Строительные и дорожные машины. – 2008. – №3. – С. 27-28.

2. Шалыгин, М.Г. Определение интенсивности изнашивания торцовых поверхностей битумного шестеренного насоса / М.Г. Шалыгин // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2009. – №9. – С. 34-39.

3. Шалыгин, М.Г. Прогнозирование ресурса работы битумных шестеренных насосов на предприятиях, производящих мягкие кровельные материалы / М.Г. Шалыгин // Строительные и дорожные машины. – 2010. – №12. – С. 50-52.

4. Шалыгин, М.Г. Анализ причин потери работоспособности шестеренных насосов при подаче битумных смесей / М.Г. Шалыгин // Строительные и дорожные машины. – 2012. – №12. – С. 11-15.

5. Шалыгин, М.Г. Водородное и абразивное изнашивание поверхностей деталей насосов при перекачивании углеводородов / М.Г. Шалыгин // Строительные и дорожные машины. – 2014. – №4. – С. 27-30.

6. Суслов, А.Г. Усталостное изнашивание поверхностей трения на уровне

субшероховатости / А.Г. Суслов, Д.Ю. Богомолов, М.Г. Шалыгин // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2015. – №4. – С. 7-10.

7. Суслов, А.Г. Адгезионный износ поверхности трения на уровне субшероховатости / А.Г. Суслов, В.В. Порошин, М.Г. Шалыгин // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2015. – №7. – С. 29-31.

8. Суслов, А.Г. Исследование поверхностей с различной механической обработкой на уровне субшероховатости / А.Г. Суслов, М.Г. Шалыгин, С.В. Кузнецов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2015. – № 9. – С. 45-47.

9. Суслов, А.Г. Взаимосвязь нанонеровностей (субшероховатости) поверхности деталей и зернистости материала / А.Г. Суслов, В.В. Порошин, М.Г. Шалыгин, С.В. Кузнецов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2015. – № 11. – С. 3-7.

10. Суслов, А.Г. Модель адгезионного износа с учетом угла наклона выступа неровностей профиля / А.Г. Суслов, М.Г. Шалыгин, В.А. Кокунов, А.П. Лукавый, А.Б. Еловинов // Фундаментальные исследования. – 2015. – №12. – Ч. 6. – С. 1144-1148.

11. Шалыгин, М.Г. Диффузия атомарного водорода в кристаллическую решетку поршневых колец двигателей внутреннего сгорания / М.Г. Шалыгин, Д.С. Ермаков // Современные научно-технические технологии. – 2016. – №4 (часть 2). – С. 281-284.

12. Шалыгин, М.Г. Моделирование изнашивания неровностей субшероховатости поверхностей трения / М.Г. Шалыгин // Строительные и дорожные машины. – 2016. – №3. – С. 42-44.

13. Шалыгин, М.Г. Формирование структуры в поверхностном слое деталей машин методами высоковакуумного отжига и ионной имплантации / М.Г. Шалыгин // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2016. – № 7. – С. 10-13.

14. Шалыгин, М.Г. Автоматизация триботехнических испытаний с применением DAQ-технологий / М.Г. Шалыгин, А.Л. Сафонов // Вестник БГТУ. – 2016. – №2(50). – С. 215-221.

15. Шалыгин, М.Г. Научно-техническая технология уменьшения водородного изнашивания рабочих поверхностей трения / М.Г. Шалыгин // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2016. – № 10. – С. 3-6.

16. Шалыгин, М.Г. Система автоматизации испытательных процессов на трение и износ при возвратно-поступательном движении / М.Г. Шалыгин, А.Л. Сафонов // Автоматизация в промышленности. – 2016. – №10. – С. 44-46.

17. Shalygin M.G. Correlation between Nano-Roughness with Grains of Austenitic Steel and Machining Quality. J. Fundam. Appl. Sci., 2016, 8(3S), 2835-2841.

18. Suslov A.G. and Shalygin M.G. The interrelation of the surface subroughness of martensitic steels with their granularity the quality of mechanical processing. AIP Conf. Proc. 1785, 040085 (2016).

19. Шалыгин, М.Г. Анализ взаимосвязей зерен материала и субшероховатости поверхности хромистой стали / М.Г. Шалыгин // Строительные и дорожные машины. – 2017. – №1. – С. 43-46.

20. Шалыгин, М.Г. Деформационно-адгезионное изнашивание нанонеровностей поверхностей трения мартенситных сталей / М.Г. Шалыгин, В.А. Кокунов, А.П. Лукавый, А.Б. Еловигов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2017. – №2. – С. 79-81.

21. Суслов, А.Г. Научно-технологическая технология повышения износостойкости поверхностей трения деталей машин, работающих в водородных средах / А.Г. Суслов, М.Г. Шалыгин // Научно-технологические технологии в машиностроении. – 2017. – № 2. – С. 19-24.

22. Шалыгин, М.Г. Деформационно-адгезионное изнашивание субшероховатости поверхностей трения аустенитных сталей / М.Г. Шалыгин // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2017. – №2. – С. 98-101.

Статьи и материалы конференций

23. Шалыгин, М.Г. К вопросу о водородном изнашивании и пластической деформации при трении / М.Г. Шалыгин, // Материалы Международной научно-технической конференции "Техника и технологии - 2014" (23-25 июня 2014г., г. Брянск). – Брянск: НДМ, 2014. – С.6-14.

24. Шалыгин, М.Г. Усталостное изнашивание поверхностей трения на уровне субшероховатости поверхности / М.Г. Шалыгин, // Материалы Международной научно-технической конференции "Тенденции развития техники и технологий - 2015" (17-19 февраля 2015г., г. Тверь). – Тверь: Надежные машины, 2015. – С.95-99.

25. Шалыгин, М.Г. Автоматизация испытаний в промышленности / М.Г. Шалыгин, А.Л. Сафонов // Материалы второй Международной научно-технической конференции "Наука, образование, производство" (06-08 октября 2015г., г. Брянск). – Брянск: НДМ, 2015. – С.46-52.

26. Шалыгин, М.Г. Модель адгезионного износа на уровне субшероховатости поверхности / М.Г. Шалыгин // XXVII Международная инновационно-ориентированная конференция молодых учёных и студентов (МИКМУС-2015): Труды конференции (Москва, 02-04 декабря 2015г.) / М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2015. – С.197-200.

27. Суслов, А.Г. Взаимосвязь субшероховатости поверхности с зернистостью материала мартенситных сталей и качеством механической обработки / А.Г. Суслов, М.Г. Шалыгин // X Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций»: Сборник материалов (Екатеринбург, 16-20 мая 2016г.). – Екатеринбург: Изд-во ИМАШ УрО РАН, 2016. – С.234-235.

28. Суслов, А.Г. Деформационно-адгезионная модель изнашивания на уровне субшероховатости поверхностей / А.Г. Суслов, М.Г. Шалыгин // Труды XI Международной научно-технической конференции «Трибология - машиностроению» (Москва, 01-03 ноября 2016г.). – М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2016. – С.231-233.

29. Шалыгин, М.Г. Определение деформационно-адгезионного изнашивания мартенситных сталей на уровне наношероховатости поверхности / М.Г. Шалыгин // XXIII Международная научно-практическая конференция «Примеры фундаментальных и прикладных исследований»: Труды конференции

(Новосибирск, 12-13 февраля 2016г.). – Новосибирск: Изд-во МиС, 2016. – С.80-84.

30. Суслов, А.Г. Изнашивание нанонеровностей поверхностей трения / А.Г. Суслов, М.Г. Шалыгин // Сборник докладов Международной научной конференции «Механика и трибология транспортных систем»: в 2 т. (Ростов-на-Дону, 08-10 ноября 2016г.) / Ростов н/Д.: ФГБОУ ВО РГУПС. – 2016. – Т. 2 – С.89-96.

31. Шалыгин, М.Г. Исследование нанонеровностей поверхностного слоя стали 40х / М.Г. Шалыгин // Сборник трудов VII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации)» (Иркутск, 26-28 апреля 2017г.) / Иркутск: Изд-во ИРНИТУ. – 2017. – С.84-89.

32. Шалыгин, М.Г. Комплексная технология повышение износостойкости деталей пар трения, работающих в водородных средах / М.Г. Шалыгин // Научное периодическое издание по материалам XVI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Механики XXI века». (Братск, 17-18 мая 2017г.) / Братск: ФГБОУ ВО БрГУ. – 2017. – №. 16. – С.194-198.

Патенты и авторские свидетельства

33. Пат. 156176 РФ, МПК G01N3/56. Машина трения / Шалыгин М.Г., Киселёва А.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Брянский государственный технический университет.— № 2015109424/28; заявл. 17.03.2015; опубл. 10.11.2015, Бюл. № 31.

34. Пат. 156860 РФ, МПК G01N3/56. Машина трения / Шалыгин М.Г., Сафонов А.Л.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Брянский государственный технический университет.— № 2015111033/28; заявл. 26.03.2015; опубл. 20.11.2015, Бюл. № 32.

35. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ 2016612911 РФ. Система управления установкой для измерения адгезии САВ-10 / М.Г. Шалыгин. Заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО Брянский государственный технический университет // Бюл. № 4.— 2016.

36. Пат. 167592 РФ, МПК C21D3/06. Установка для обезводораживания деталей / Шалыгин М.Г.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Брянский государственный технический университет.— № 2016100499; заявл. 11.01.2016; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1.

37. Решение о выдаче патента от 25.04.2017. Устройство для определения адгезии металлических поверхностей / Шалыгин М.Г.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Брянский государственный технический университет. — заявка № 2016100519; заявл. 11.01.2016.

ШАЛЫГИН МИХАИЛ ГЕННАДЬЕВИЧ

**ИЗНАШИВАНИЕ СУБШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ
В ВОДОРОДСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЕ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук
Специальность 05.02.04 – «Трение и износ в машинах»

Подписано в печать . . . 2017г. Формат 60х84 1/16.

Бумага офсетная. Офсетная печать. Печ. л. 2,0. Усл. изд. л. 2,0.

Тираж 130 экз. Заказ . Бесплатно.

Издательство Брянского государственного технического университета
241035, г. Брянск, бульвар 50лет Октября, 7.

Подразделение оперативной полиграфии БГТУ, ул. Харьковская, 9