

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |     |
|---|-----|
| ПРЕДИСЛОВИЕ .....   | 6   |
| ВВЕДЕНИЕ .....  | 15  |
| Раздел 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ.....  | 19  |
| Глава 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ<br>И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПОЛОЖЕНИЙ ТРИБОЛОГИИ В ПРИЛОЖЕНИИ<br>К ТРИБОТЕХНИКЕ И ТРИБОХИМИИ.....   | 19  |
| 1.1. Причины и закономерности трения и износа.<br>Основные положения трибологии.....  | 19  |
| 1.2. Химические аспекты трения и износа. Трибохимические реакции<br>с позиций координационной химии.....  | 25  |
| 1.3. Электрохимические процессы в трибохимии .....  | 32  |
| 1.4. Структурные методы физикохимии твердого тела в триботехнике .....  | 36  |
| Глава 2. ТЕОРИИ ТРЕНИЯ.....   | 40  |
| 2.1. Анализ теоретических зависимостей трибологии .....   | 40  |
| 2.1.1. Кинетическая характеристика трения.....  | 41  |
| 2.1.2. Статическая характеристика трения .....  | 45  |
| 2.2. Анализ основных положений адгезионной<br>и молекулярно-механической теорий трения .....  | 50  |
| 2.2.1. Адгезионная теория трения.....   | 50  |
| 2.2.2. Молекулярно-механическая теория трения .....   | 50  |
| 2.2.3. Представление фактора времени<br>в молекулярно-механической теории трения.....   | 57  |
| Глава 3. ТРИБОХИМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ТРЕНИЯ .....  | 71  |
| 3.1. Трибохимическая кинетика процессов трения. Топохимическая кинетика<br>адгезионного взаимодействия двух твердых тел в процессе трения скольжения.....   | 71  |
| 3.1.1. Первый кинетический порядок реакции перехода зародышей<br>в активно растущие ядра схватывания .....  | 73  |
| 3.1.2. Второй кинетический порядок реакции перехода зародышей<br>в активно растущие ядра схватывания .....  | 79  |
| 3.1.3. Второй кинетический порядок реакции перехода зародышей<br>в активно растущие ядра схватывания при неравенстве<br>начальных концентраций зародышей на контактирующих поверхностях трения..... | 79  |
| 3.1.4. Характер топохимических кинетических зависимостей<br>при учете механохимической и тепловой активации .....   | 80  |
| 3.2. Трибохимическая кинетика процессов изнашивания. Формулировка задач<br>при конструировании математических моделей<br>технической диагностики узлов трения.....                                  | 86  |
| Раздел 2. ДИАГНОСТИКА ВОДОРОДНОГО ИЗНОСА.....   | 101 |
| Глава 4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОДОРОДА С МЕТАЛЛАМИ<br>И ЕГО СВЯЗЬ С ИЗНОСОМ .....   | 101 |
| 4.1. Термодинамическое обоснование взаимосвязи износа образцов<br>в триботехнических системах с интенсивностью выделения водорода.....  | 101 |
| 4.2. Водородный износ и методы его исследования.....  | 103 |

|   |            |
|---|------------|
| 4.2.1. Взаимодействия при фрикционном контакте .....  | 103        |
| 4.2.2. Взаимодействие водорода с металлами .....  | 108        |
| 4.2.3. Водородный износ при фрикционном контакте .....  | 109        |
| 4.2.4. Экспериментальные методы исследования наводороживания .....  | 115        |
| <b>Глава 5. ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС И МЕТОДЫ</b><br><b>ТРИБОХИМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НА ВОДОРОДНЫЙ ИЗНОС .....</b>  | <b>122</b> |
| 5.1. Триботехнический измерительный комплекс<br>и методы исследований и испытаний .....   | 122        |
| 5.1.1. Анализ требований, предъявляемых к методу<br>триботехнических исследований .....   | 122        |
| 5.1.2. Задачи, назначение и состав триботехнического<br>измерительного комплекса .....  | 124        |
| 5.2. Оптоэлектронные датчики перемещений .....  | 127        |
| 5.2.1. Конструктивно-технологические особенности<br>оптоэлектронных транзисторов .....  | 128        |
| 5.2.2. Конструктивные особенности датчиков и их характеристики .....  | 129        |
| 5.2.3. Методика триботехнических испытаний с использованием<br>оптоэлектронного датчика .....   | 137        |
| 5.3. Газоаналитический блок триботехнического комплекса .....   | 139        |
| 5.3.1. Блок-схема отбора проб газа .....  | 139        |
| 5.3.2. Блоки измерения содержания водорода .....  | 142        |
| 5.3.3. Блок термодесорбции диффузионно-подвижного водорода<br>и методики исследования наводороживания .....   | 158        |
| 5.3.4. Метод определения водорода лазерным отбором проб<br>в потоке инертного газа с использованием твердоэлектролитного детектора<br>для исследования триботехнического наводороживания материалов ..... | 161        |
| <b>Глава 6. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ</b><br><b>НАВОДОРОЖИВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ .....</b>  | <b>180</b> |
| 6.1. Исследование триботехнического наводороживания материалов .....  | 180        |
| 6.1.1. Исследование содержания металлургического водорода<br>в стальных образцах .....  | 180        |
| 6.1.2. Исследование перераспределения водорода в процессе<br>технологической обработки материалов .....   | 183        |
| 6.1.3. Определение водорода в газовой фазе машины трения .....  | 185        |
| 6.1.4. Исследование триботехнического наводороживания стальных образцов .....   | 187        |
| 6.2. Исследование локального распределения водорода<br>в стальных образцах при триботехнических испытаниях .....  | 193        |
| 6.2.1. Методика определения локального распределения водорода в сталях .....  | 193        |
| 6.2.2. Исследование локального наводороживания стальных образцов<br>при работе узла трения открытого типа .....   | 194        |
| 6.2.3. Исследование локального наводороживания стальных образцов<br>при работе узла трения закрытого типа .....   | 199        |
| 6.2.4. Исследование процесса наводороживания на «дорожках трения» .....   | 202        |
| 6.3. Исследование зависимости между интенсивностью износа<br>и выделением водорода при триботехнических испытаниях .....  | 203        |

|  |     |
|--|-----|
| 6.3.1. Влияние технологических параметров на характер зависимости количества выделившегося водорода от интенсивности износа..... | 203 |
| 6.3.2. Статистическая обработка экспериментальных данных.....  | 212 |
| ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ .....   | 221 |
| КЛЮЧИ К ТЕСТОВЫМ ЗАДАНИЯМ.....   | 278 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ.....  | 280 |
| Приложение 1. КОНСТРУКЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ МАШИН ТРЕНИЯ ММТ-1, ММТ-2 .....                                       | 280 |
| Приложение 2. МЕТОДИКА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИН ТРЕНИЯ ММТ .....  | 284 |
| Приложение 3. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ .....  | 286 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....   | 288 |

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время бурно развивающейся областью технологии и техники является материаловедение. Специалисты-материаловеды – химики, технологи и инженеры – создают большое количество новых конструкционных материалов. Однако быстрое вовлечение этих материалов в процесс создания новых образцов техники, технологий обслуживания машин и агрегатов зачастую сдерживается отсутствием методов исследования и испытаний в применении к заданным условиям их эксплуатации. Методы исследования и испытаний постоянно совершенствуются в связи с актуальностью задач, которые ставит практика.

Прогресс теоретической триботехники в настоящее время определяется решением следующих актуальных проблем, возникших на стыке механики и химии, которые оформились в предмет исследования специальных дисциплин (механохимии и трибохимии):

- формулировка задач в терминах теорий подобия и размерностей;
- разработка алгоритмов «перевода» математических моделей с «языка» химической кинетики на «язык» теоретической механики (например, прочностных, усталостных и других характеристик материала) и обратно;
- разработка алгоритмов статистической обработки данных триботехнического и трибохимического эксперимента с целью расчета кинетических констант как подгоночных параметров с последующей физико-химической интерпретацией значений полученных величин;
- формулировка задач, в которых, в отличие от топохимической кинетики, образование зародышей ядер адгезионного схватывания, дефектов, дислокаций и тому подобного принимается не априорно, а является следствием электрохимических и каталитических реакций в зоне фрикционного контакта, течение которых, в свою очередь, обусловлено конструкцией и режимом эксплуатации фрикционной пары. При этом взаимосвязь химических и механических величин строится методами механохимии.

Актуальность многих проблем триботехники и трибохимии рассмотрена Д. Н. Гаркуновым [12]. Так, например, смазочные и регулировочные работы занимают более 50% времени на техническое обслуживание автомобилей, 60% – текстильного оборудования и до 40% – самолетов. Применение металлоплакирующих смазочных материалов позволяет в 3 раза сократить такие затраты. В настоящее время решение научно-технических проблем необоснованно отодвигается на второй план. Это не способствует повышению качества машиностроительной продукции, выпуску машин и оборудования с принципиально новыми потребительскими свойствами. Предприятия часто не заинтересованы в выпуске надежной высокопроизводительной техники, а стремление к получению прибыли за счет снижения себестоимости или повышения цен приводит к определенным экономическим потерям. По экспертной оценке, ежегодно заменяется около 10% машин и оборудования (на автотранспортных предприятиях – 6–8% и т. д.). При таком темпе замены машиностроительной продукции срок ее службы должен быть 10–15 лет. В действительности по отдельным видам техники он значительно больше, надежность техники при этом снижается, увели-

чивается поток отказов. Это отражается на производительности машин и оборудования, а главное, увеличивает затраты на эксплуатацию техники. Так, на автомобильном транспорте в результате снижения надежности двигателей автомобилей увеличивается удельный расход топлива: изношенный двигатель расходует топлива в 1,5–2 раза больше, чем новый. Это влечет за собой удорожание перевозок. Часто производители автотранспортных средств не заинтересованы в повышении надежности автомобилей при наличии рынка сбыта. Предприятия, эксплуатирующие эти автотранспортные средства, вынуждены увеличивать затраты на их ремонт, на горюче-смазочные материалы и др. Возникает необходимость повышения тарифов на грузовые и пассажирские перевозки. Финансовые затраты в результате недостаточной надежности техники перекладываются на потребителя. Поскольку потребителями выступают различные отрасли, в том числе производящие материалы и комплектующие изделия, необходимые для производителей автотранспортной техники, расходы из-за недостаточной надежности и долговечности последней в конечном счете ложатся на предприятия, производящие эти автотранспортные средства. Это вызывает необходимость увеличения оптовых и розничных цен на автотранспортные средства и повторно повышает экономические затраты потребителя.

Аналогичная ситуация характерна для большинства видов машиностроительной продукции. Особенно серьезные последствия это вызывает в станкостроении, поскольку оно определяет научно-технический прогресс в машиностроении. Надежность техники в настоящее время является не столько технической, сколько экономической категорией.

Причина отказов машин и механизмов на 80% случаев происходит в результате износа деталей и узлов трения. Надежность массовых видов отечественной техники значительно ниже мирового уровня. По автомобильным двигателям внутреннего сгорания средний пробег до прекращения эксплуатации составляет 400 тыс. км, у зарубежных двигателей – 800–900 тыс. км. Кроме того, в течение определенного производителем срока службы автомашины проходят многократный ремонт, в том числе и капитальный. Например, двигатели внутреннего сгорания автомобилей для достижения пробега в 400 тыс. км капитально ремонтируются от одного до шести раз. Срок службы отремонтированных двигателей в 2–3 раза, а экономичность в 1,5 раза ниже, чем новых.

Для повышения качества ремонта выбран путь создания специализированных предприятий с высокими объемами производства ремонтных работ, что значительно увеличивает транспортные расходы и объемы перевозок. Часто «фирменное» обслуживание приводит к дополнительным затратам потребителей. Происходит также усиление монопольных тенденций производителей, усложнение производственных структур и дополнительное финансирование программ производства запасных частей. Все это является следствием низкой надежности техники.

По этой причине стала общепризнанной планово-предупредительная система ремонта, носящая в большинстве случаев регрессивный характер. Предприятия – изготовители машиностроительной продукции с целью повышения надежности выпускаемой ими техники ужесточают сроки проведения регла-

ментных работ при ее эксплуатации и увеличивают их объем. Эксплуатирующие предприятия, которые заинтересованы в выполнении производственных задач и испытывают дефицит в запасных частях, наряду с затратами на организацию работ по техническому обслуживанию машины вынуждены организовывать соответствующие ремонтные службы, создавать второй уровень планово-предупредительного ремонта. Это вызывает увеличение себестоимости выпускаемой продукции и снижает ее качество, так как вместо обновления технологий и оборудования предприятие вынуждено затрачивать значительные средства на поддержание надежности приобретенных ранее средств производства и орудий труда.

Для экономически целесообразного и более надежного предупреждения отказов машин и оборудования необходим переход к их эксплуатации по техническому состоянию, усовершенствование методов диагностики машин, обеспечение средствами диагностики предприятий, эксплуатирующих технику. Сложившаяся система планово-предупредительного ремонта и нормативная база по обслуживанию техники не стимулируют в эксплуатирующих организациях использование и совершенствование аппаратной диагностики для определения состояния каждого механизма машины. Это означает, что не выявляются индивидуальные особенности машин, связанные с условиями их производства и эксплуатации. Это, в свою очередь, влечет снижение требований к персоналу, обслуживающему машины и оборудование.

В этом случае невозможно определить причины отказа, поскольку изнашивание машины – процесс длительный, и если он не контролируется при эксплуатации, то становится заметным только по изменению технико-экономических показателей работы машины или механизма – точности прецизионного станка; расхода топлива двигателем; доли некондиционной (бракованной) продукции, выпускаемой на данном оборудовании; удельных энергетических затрат и др. Если же требования к эксплуатационной технике невысоки, износ проявляется в виде отказа, поломки, выхода из строя.

Сведение проблемы надежности продукции машиностроения к характеристике «наработка на отказ» или времени до выхода из строя сказывается отрицательно. При этом считается, что эту характеристику надежности можно использовать только как крайнюю меру оценки состояния техники, поскольку затраты на ремонт и обслуживание длительно эксплуатирующихся машин и оборудования, как известно, в 5–10 раз превышают затраты на их изготовление. Поэтому более важна экономическая интерпретация надежности, т. е. способность машин, оборудования длительно сохранять свои первоначальные технико-экономические показатели, связанные с основным функциональным назначением.

Вопросы повышения надежности машин и оборудования часто связывают только со снижением затрат на их ремонт и расход запасных частей. Однако более правильным в этом случае является экономическое обоснование, учитывающее сокращение эксплуатационных затрат в целом, т. е. сокращение расхода топлива, смазочных материалов, энергии, а также увеличение производительности машин и оборудования в результате уменьшения простоев при ремонте, сокращения доли некондиционной продукции и др. Для таких обоснова-

ний важны методы расчета, позволяющие определить экономическую эффективность использования новых технологий, повышающих надежность техники и, в частности, эффекта безызносности или избирательного переноса при трении.

Повышение надежности техники при ее изготовлении и эксплуатации зависит от правильного решения вопросов функционирования узлов трения механизмов, т. е. от применения достижений трибологии и триботехники, где особое место принадлежит трибохимическому процессу – избирательному переносу при трении. Открытие избирательного переноса при трении Д. Н. Гаркуновым и Н. В. Крагельским в 1960-х гг. [11, 33] предоставило возможность реализации трения твердых тел без износа контактирующих поверхностей.

Одна из наиболее интересных особенностей процесса избирательного переноса при трении заключается в самопроизвольном образовании защитной разделительной пленки из пластичного металла на контактирующих поверхностях. Процесс трения в таких условиях из разрушительного становится созидательным. Это позволяет по-новому рассмотреть вопросы изготовления и эксплуатации техники, имеющей узлы трения. В этом случае основным условием является правильный выбор методов, позволяющих создать так называемую сервовитную разделительную пленку на поверхностях трения и поддерживать ее в процессе эксплуатации машины. Возможны различные подходы для решения задачи создания разделительной пленки.

Саморегулирующийся процесс устойчивого существования сервовитной пленки возможен при наличии двух основных факторов ее образования: потока энергии и потока материи. Поток энергии реализуется за счет механического движения деталей машины и представляет собой сложное сочетание кинетической (механической), тепловой, химической, электрической и других видов энергии. Поток материи реализуется различными путями. Поставщиками металла для образования сервовитной пленки могут быть смазочные материалы, используемые для узла трения. При этом металл для образования пленки может находиться в кристаллическом или ионном состоянии, а смазочный материал должен обладать рядом свойств, обеспечивающих ионообменные процессы, приводящие к образованию и поддержанию сервовитной пленки. Наиболее исследованным в отношении реализации избирательного переноса металлом является медь. Для образования сервовитной пленки на поверхностях трения медь может быть введена в смазочный материал или содержаться в одном из контактирующих твердых тел в виде покрытия или цветного сплава. Использование избирательного переноса при трении, в отличие от других методов повышения износостойкости деталей, связано с подбором конструкционных и смазочных материалов для пары трения и со специальной поверхностной обработкой, обеспечивающих длительную работу узла трения практически без износа.

Стремление к достижению минимального износа деталей в узлах трения привело к формированию четырех основных направлений поиска технических решений в триботехнике, основанных на эффекте безызносности, – к созданию новых (1) конструкций узлов трения; (2) конструкционных и смазочных материалов; (3) технологий обработки поверхностей деталей узлов трения; (4) си-

стем и режимов смазывания узлов трения. Общим для всех этих технических решений является генерация пленок пластичных металлов на трущихся поверхностях с целью предотвращения непосредственного контакта этих поверхностей и перевод таких пленок в состояние саморегулирования (без выноса металла из зоны трения) за счет избирательного переноса. Образующаяся на сопряженных поверхностях деталей сервовитная пленка позволяет повысить нагрузочные параметры пары трения, задиростойкость поверхностей, особенно в период приработки и пуска-останова машины. Существуют примеры таких технических решений, позволяющих принципиально по-новому разрабатывать машины и оборудование, эксплуатировать их и обслуживать.

Так, например, разработана и применяется в промышленности конструкция подшипника скольжения из чередующихся бронзовых и полимерных элементов. Такая конструкция позволяет смазывать узел трения водой и водными растворами и реализовать избирательный перенос при трении. Разработан и используется материал с высокой износостойкостью из полиуретана, легированного медью. Использование этого материала для уплотнений механизмов позволяет в 10 раз повысить износостойкость манжетных уплотнений и исключить использование дефицитных сталей и сплавов для контртела в паре трения, поскольку такие уплотнения за счет генерации пленки меди на поверхности уплотнения не вызывают изнашивания металлической сопряженной поверхности.

Другой пример – технология финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО), позволяет с помощью трения нанести на рабочие поверхности деталей тонкие пленки пластичных металлов. Гильзы цилиндров двигателя автомобиля КамАЗ, подвергнутые финишной антифрикционной безабразивной обработке в течение 20–30 с, имеют в 2,5 раза более высокую износо- и задиростойкость, чем серийные гильзы без обработки. Усовершенствование метода финишной антифрикционной безабразивной обработки позволило разработать способы нанесения многослойных покрытий из пластичных металлов, работающих длительное время без подачи смазки. Этот способ используется при восстановлении коленчатых валов двигателей сельскохозяйственной техники.

Разработаны материалы для узлов трения, работающих в условиях смазывания агрессивными органическими и неорганическими кислотами. Результаты этих работ позволили подобрать сочетания материалов, генерирующие защитные пленки на трущихся поверхностях при работе в кислых электролитах. Разработаны и используются подшипники скольжения на основе волокон ПТФЭ (политетрафторэтилена) и пластичных металлов, позволяющие исключить смазывание тяжелонагруженных подшипников. Разработана технология получения меднистого чугуна и показана эффективность замены таким чугуном антифрикционной бронзы с обеспечением возможности повышения контактных давлений на поверхности трения более чем в 2 раза.

Разработаны и используются в различных видах техники металлоорганические маслорастворимые присадки к смазочным материалам, позволяющие значительно повысить ресурс узлов трения при смазывании традиционными маслами и смазками. Медьсодержащие присадки позволяют радикально улучшить антиизносные свойства базовых смазочных материалов. Разработаны и

используются металлоплакирующие смазочные материалы, позволяющие повысить надежность узлов трения при высоких удельных давлениях и скоростях скольжения, сократить количество заправок или перейти на разовую заправку узлов трения.

Приведенные примеры, не охватывая всех разработок, реализующих эффект безызносности при трении, показывают достаточно широкий спектр открывающихся технических возможностей в области изготовления и эксплуатации машин и оборудования. По сути дела, реализация избирательного переноса при трении возможна самыми различными путями. Избирательный перенос как физическое явление имеет такую особенность, что при его реализации не только генерируется пленка пластичных металлов на трущихся поверхностях, но и удерживается в зоне контакта за счет электрических сил с последующим саморегулированием.

На этапе изготовления машины могут быть использованы технология финишной антифрикционной безабразивной обработки для деталей узлов трения и, после сборки машин, медьсодержащие органические присадки в смазочном материале на операции заводской обкатки. Проверка эффективности этих технологий показала, что эксплуатационный ресурс узла трения может быть повышен более чем в 1,5 раза при одновременном сокращении расхода смазочных материалов. Сочетание указанных воздействий на узлы трения машин позволяет не только увеличить ресурс, но и длительное время поддерживать на постоянном уровне их основные технические и экономические показатели.

Ведущие фирмы, производящие нефтепродукты, используют различные металлосодержащие присадки к смазочным материалам. Однако присадки, реализующие избирательный перенос при трении, обладают рядом преимуществ, к числу которых относятся: более длительная работа без пополнения смазки присадкой (низкая себестоимость) и малое количество присадки на одно введение в смазочный материал (от 0,05 до 0,2% для масел и от 0,5 до 1% для смазок).

Эти результаты вполне объяснимы с точки зрения трибохимических особенностей используемых металлов и их соединений. Соединения меди при трении разлагаются, и ионы меди за счет наличия ювенильных поверхностей и электродной разности потенциалов по отношению к железу образуют пленку меди с хорошей адгезией на стальной поверхности, причем толщина такой пленки не более 300–400 Å (30–40 нм).

Если машина изготовлена и эксплуатируется без применения указанных выше технологий и материалов, ее технические и экономические показатели постепенно снижаются. Для их восстановления без разборки машины и ремонта, включающего замену изношенных деталей, разработаны специальные технологии финишной антифрикционной безабразивной обработки – ФАБО-2.

Разработана технология безразборного восстановления трущихся поверхностей двигателей внутреннего сгорания. Метод заключается в наращивании пленки пластичного металла на трущихся поверхностях деталей в процессе работы двигателя с помощью трения. При введении в масло двигателя при его работе пластичных металлов в смеси с поверхностно-активными веществами происходит очистка и активизация поверхностей трения. Образованные юве-

нильные поверхности, обладая большой активностью, позволяют создать многочисленные связи адсорбционного характера между поверхностью трения и пластичным металлом из смазочного материала. В свою очередь, поверхностно-активные вещества значительно снижают усилия на сдвиг частиц пластичного металла, и последние равномерно распределяются на контактирующих поверхностях деталей. При повторных актах трения количество пластичного металла, вовлекаемого в зону контакта, увеличивается и на поверхностях трения образуется пленка, для поддержания которой используется металлоорганическая присадка в смазочном масле. Действие присадки закрепляет перевод вновь образованного покрытия в режим работы с реализацией избирательного переноса.

Технология ФАБО-2 основана на применении принципов ФАБО и избирательного переноса при трении. Отдельные результаты применения ФАБО-2 можно рассмотреть на примере безразборного восстановления четырехтактного карбюраторного двигателя Заволжского моторного завода, устанавливаемого на автомобилях ГАЗ. Безразборному восстановлению подвергали двигатели с пробегом более 100 тыс. км (120 экспериментальных двигателей). Увеличение компрессии в цилиндрах, фиксируемое самопишущим компрессометром, составило от 1 до 1,5 кг/см<sup>2</sup> (0,10–0,15 МПа), т. е. до 15% при одновременном выравнивании значений по четырем цилиндрам. Снижение содержания СО в выхлопных газах составило от 100 до 500% при полностью отрегулированных карбюраторе и соотношении воздуха к топливу. Для определения длительности сохранения параметров двигателей после обработки проводили контроль компрессии в цилиндрах и содержания СО в выхлопных газах через каждые 15 тыс. км пробега. Эффект, полученный после обработки, снижался и пропадал после 15 тыс. км пробега без добавления медьорганической присадки во вновь заливаемое моторное масло. При добавлении присадки в моторное масло эффект от обработки оставался неизменным вне зависимости от величины пробега.

Таким образом, путем применения ФАБО-2 улучшается процесс сгорания топлива в двигателях с соответствующим увеличением мощности и снижением расхода топлива и длительное время сохраняются технико-экономические показатели работы двигателя. Обработка проводится на работающем двигателе без его разборки в течение 1,5 ч, поэтому технология ФАБО-2 экономически целесообразна.

Аналогичные результаты получены на широком спектре двигателей: карбюраторных, с прямым впрыском топлива в цилиндры мощностью до 150 л. с., включая двигатели фирм «Мерседес», «Опель»; дизельных, в том числе двигателей «Пилстик» – для автомобилей; судовых вспомогательных дизель-генераторов, тепловозных мощностью до 2500 л. с. Сокращение расхода топлива в двигателях внутреннего сгорания составляет до 15%. Применение технологии ФАБО-2 позволяет повысить эффективность и экономичность работы компрессорных установок, снизить шум станков, повысить их точностные характеристики. Сочетание технологий ФАБО, ФАБО-2 с использованием присадок к смазочным материалам позволяет реализовать избирательный перенос при трении. Применение этих технологий дает возможность при эксплуатации машин производить только их обслуживание по техническому состоянию без ремонтных работ.

Следует отметить, что с трибохимической точки зрения медьсодержащие присадки блокируют наводороживание сталей. Это происходит за счет подавления окислительной способности водородсодержащих материалов по отношению к восстановителю – металлу, более сильным окислителем – ионами меди, которые в то же время при восстановлении до металла образуют защитную сервовитную пленку пластичного металла – меди. Таким образом, медьсодержащие присадки к смазочным материалам выполняют две функции – блокирование окислительно-восстановительного процесса разложения водородсодержащего материала и наводороживание металла и реализацию другого окислительно-восстановительного процесса (вместо первого) восстановления ионов меди с образованием защитной сервовитной пленки. Процесс наводороживания является одним из составляющих износа при трении, что хорошо известно, но его рассмотрение в связи с трибохимической металлизацией трущихся поверхностей в исследованиях избирательного переноса до настоящего времени не проводилось.

В связи с этим в учебнике с позиций теоретических и экспериментальных исследований трения и износа и производственных испытаний обобщены некоторые результаты, которые могут поставить рассмотрение этих проблем с точки зрения данной трибохимической концепции. При этом особая ценность книги заключается в подробном представлении теоретических сведений, практических задач в области триботехнической диагностики и диагностики водородного износа, а также результатов исследований наводороживания материалов.

Целью учебника «Триботехническая диагностика» является формирование у студентов совокупности теоретических знаний, умений и приобретение практических навыков в области определения основных триботехнических параметров трущихся сопряжений, оценки способов износостойкости, моментов и сил трения, диагностики узлов трения подвижных сопряжений машин, механизмов и оборудования.

В результате освоения данного курса студенты должны:

**знать:**

- сведения о способах измерения основных триботехнических параметров: износа, сил и моментов трения, температуры на поверхностях трения;
- основные стандартные методы определения физико-механических свойств конструкционных материалов и проблемы их экономии;
- динамику развития представлений о внешнем трении;
- физические основы эффекта безызносности;
- механизм избирательного переноса при трении и его закономерности;
- основные характерные свойства материалов, применяемых в триботехнике и триботехнологии;
- основы теории изнашивания, классификацию видов изнашивания и методы определения остаточного ресурса деталей;
- методы прогнозирования изнашивания с учетом механических, физико-механических и геометрических факторов;
- основные подходы к решению тепловых задач трения;

***уметь:***

- рассчитывать и анализировать основные физико-механические характеристики материалов, параметры трибометрических измерений и др.;
- выявлять и анализировать причины увеличения скорости изнашивания;
- определять оптимальные режимы работы пар трения в машинах и механизмах;
- пользоваться справочной технической литературой для проведения расчетов и выбора необходимого материала по заданным условиям эксплуатации изделий;
- определять износостойкость рабочих поверхностей и строить износную кривую;
- выбирать наиболее приемлемый метод трибодиагностики для узлов трения со смазочным материалом и без смазочного материала;

***владеть:***

- навыками работы на отечественном и зарубежном лабораторном оборудовании для определения основных свойств конструкционных материалов и параметров триботехнических испытаний;
- навыками расчета опор трения без смазочного материала при граничной смазке;
- навыками работы на машинах трения и экспериментального диагностирования узлов трения по продуктам, содержащимся в смазочных материалах;
- навыками расчета коэффициента трения качения;
- навыками прогнозирования изнашивания с учетом механических, физико-механических и геометрических факторов.

Результатом освоения дисциплины «Триботехническая диагностика» является приобретение обучающимися общепрофессиональных и профессиональных компетенций, соответствующих уровню образования, которые проявляются в планируемом освоении научных знаний, приобретении практических умений и овладении производственными навыками.

Издание предлагаемого учебника является полноценным этапом внедрения передовых технологий обеспечения работоспособности машин и оборудования машиностроительного назначения и, несомненно, окажет большую помощь магистрам, бакалаврам и аспирантам в формировании предусмотренных образовательным стандартом профессиональных компетенций, связанных с теоретической и экспериментальной научной деятельностью.

## ВВЕДЕНИЕ

Химические реакции при трении и износе являются сложными процессами, суммирующими большое число факторов, которые определяются интегральными характеристиками. Функции смазочных материалов сводятся к снижению трения и износа, а в более широкой трактовке – к управлению взаимодействием контактирующих материалов с получением необходимого результата в форме низкого или высокого значения показателя, характеризующего трение и износ.

Попытки связать молекулярную структуру смазочного материала с вызываемым им эффектом предпринимаются постоянно [4, 12, 33, 34]. Однако практически невозможно полностью оценить смазочные масла на основании данных физико-химических анализов [29]. Для получения информации при смешанном режиме трения в условиях контактно-гидродинамической смазки необходимо проводить стендовые испытания. Это свидетельствует о том, что сложный процесс трения и износа теоретически не может быть реконструирован путем сочетания элементарных стадий, т. е. не существует возможности полно представить механизм процесса. Необходимость стендовых испытаний говорит об одном-единственном пути дать характеристику пары трения и смазочного материала: провести технологическое моделирование процесса трения и износа в некоторых стандартных условиях. Использование эмпирических закономерностей при обработке результатов стендовых испытаний фактически является стандартной формой представления получаемых опытных данных.

Функция смазочного материала заключается в обеспечении низкого уровня трения между парами скольжения для предотвращения износа, отвода теплоты трения и удаления продуктов износа из зоны трения, воспринимающей нагрузку, а также в предотвращении попадания инородных веществ в смазочный зазор [29]. Различают жидкостной и граничный режимы смазки. Считается, что в режиме жидкостного трения пары скольжения полностью разделены смазочной пленкой и не контактируют между собой даже при возрастающих нагрузках (истинные гидродинамические и гидростатические режимы). Предполагается, что в случае граничного трения могут иметь место все промежуточные стадии сухого и смешанного трения; контактно-гидродинамический режим реализуется в зоне очень высоких нагрузок и в случае плохо приработанных пар трения.

Основной модельной интегральной характеристикой трения в случае стендовых испытаний является кривая Штрибека – Гарси, которая отражает влияние на коэффициент трения вязкости смазочного масла, нагрузки на подшипник и скорости скольжения. На этой кривой фиксируется переход от режима граничного трения к жидкостному, а также то, что снижение вязкости, вызываемое повышением температуры или напряжением сдвига, смещает рабочий диапазон подшипника в область смешанного трения. Считается, что действие высокой нагрузки приводит к увеличению вязкости и дает некоторую компенсацию этих двух воздействий. При пуске или остановке подшипник проходит область смешанного трения, в которой и происходит основной износ. С практической точки зрения кривая Штрибека – Гарси показывает, что при подборе

смазки должен быть найден компромисс в отношении вязкости масла между потерями на трение в области гидродинамического режима и износа при переходе через область смешанного трения.

Смазывание тяжелонагруженных и неприработанных поверхностей трения происходит в контактно-гидродинамическом режиме. В условиях контактно-гидродинамического трения поверхности скольжения, испытывающие высокие нагрузки, находятся в квазилинейном взаимном контакте, при котором возможны упругие деформации. Они приводят к увеличению зоны, несущей нагрузку. Эти упругие деформации обратимы при снятии нагрузки. Считается, что в условиях упругой деформации вязкость сжимаемого в малом зазоре масла настолько сильно возрастает, что обеспечивает гидродинамический режим. При этом между изменением давления на трущейся поверхности в процессе трения и толщиной формирующегося смазочного слоя устанавливается определенное соотношение, которое обеспечивает необходимую толщину для реализации режима гидродинамической смазки. Эти явления взаимосвязаны уравнениями гидродинамики, уравнением состояния (вязкость – давление – температура) и уравнением упругости. Однако по изменению силы трения в момент пуска и в зоне перехода от граничного трения к смешанному не удается получить расчетные результаты, которые были бы пригодны для практического применения. Более того, согласование расчетных и экспериментальных результатов не удастся получить, даже если ввести зависимость вязкости от давления (методика расчета Фогельполя с использованием критерия Зоммерфельда).

В связи с этим предполагают существование пленок на поверхностях, которые влияют на коэффициент трения твердых тел при отсутствии между ними смазочного слоя. Считается, что пленки на поверхности могут образовываться из смазочного масла в результате адсорбции, хемосорбции или трибохимических реакций. Подобные пленки влияют на акт смазывания благодаря тому, что они разделяют трущиеся пары и обладают высокой стойкостью к сдвигу и более низким коэффициентом трения, чем трущиеся пары в случае сухого трения. Предполагается, что граничные пленки такого типа имеют толщину 1–20 молекул, а трибохимические слои могут быть еще толще.

Образование пленок происходит за счет адсорбции, которая зависит от концентрации полярных веществ в смазочном масле и от температуры. Термическая стойкость таких пленок низкая. Они десорбируются тем легче, чем ниже концентрация адсорбата в смазочном масле и чем ниже его адсорбционная способность. Плотность покрытия поверхности зависит от пространственной структуры молекулы и положения полярной группы. Молекулы с прямой цепью и полярной группой на конце цепи образуют более плотные покрытия, чем молекулы с разветвленным радикалом или полярной группой в середине цепи.

Коэффициенты трения поверхностей, покрытых адсорбированными пленками, уменьшаются с увеличением длины углеводородной цепи. Предполагается, что это связано с тем, что силы когезии между ориентированными молекулами адсорбата увеличиваются по мере увеличения длины цепи, повышая несущую способность пленки.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)