МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ГОМЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени П. О. СУХОГО

В. Л. ПОТЕХА

ТРИБОДИЛАТОМЕТРИЯ

Гомель 2000

ББК 34.413
П – 64
УДК 621.891.004.14:53.082

Потеха В. Л.
Трибодилатометрия. – Гомель: ГГТУ, 2000. – 374 с.: 91 ил.
ISBN 985–6514–81–9

В книге впервые в отечественной литературе представляются результаты исследований, осуществленных в рамках нового направления в трибологии – трибодилатометрии. Рассматриваются вопросы, связанные с терминологией развиваемого направления, методиками исследования и источниками погрешностей измерения изнашивания и дилатации трибосистем. Представлены оригинальные устройства для исследований характеристик трибоматериалов. Приводятся результаты экспериментальной проверки разработанных приборов и методик измерений в процессе испытаний металлических и металлополимерных трибосопряжений, а также пар трения, на поверхности деталей которых нанесены тонкослойные полимерные или олигомерные покрытия.

Монография рассчитана на широкий круг научных и инженерно-технических работников, занимающихся проблемами трения, изнашивания и смазывания, и может быть полезна преподавателям, аспирантам и студентам машиностроительных специальностей.

Табл. 18. Ил. 91. Библиогр. 976.

Издание осуществлено при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

Рецензенты:

главный научный сотрудник ИММС НАН Беларуси им. В. А. Белого, профессор, д. т. н. **В. Г. Савкин;**

заведующий проблемной научно-исследовательской лаборатории перспективных материалов ГГУ им. Ф. Скорины профессор, д. т. н. **И. М. Мельниченко**.

ISBN 985–6514–81–9

© В. Л. Потеха,2000

МОИМ РОДИТЕЛЯМ
Леониду Даниловичу
и
Татьяне Ивановне

Сведения об авторе

Потеха Валентин Леонидович – по образованию инженер-механик, кандидат технических наук, доцент кафедры «Детали машин» Гомельского государственного технического университета. Специализируется в областях трибодиагностики, ремонта и эксплуатации машин. Автор 120 публикаций и научных статей в журналах: «Трение и износ», «Tribologia», «Вестник машиностроения», «Заводская лаборатория», «Измерительная техника», «Известия национальной Академии наук Беларуси», имеет более 20 изобретений и патентов. Участник ряда международных симпозиумов и конференций по трибологии и ремонту машин в США, Польше, Чехословакии, Болгарии, Словакии и странах СНГ. Участвовал в исследованиях и разработках нескольких международных трибологических проектов, реализованных по линии ООН (ЮНИДО).

Специальные благодарности

Книга «Трибодилатометрия» по большому счету является результатом совместного творчества многих талантливых и преданных своему делу людей. Трудно перечислить имена тех, кого мне хотелось бы поблагодарить за самую разностороннюю помощь в этой работе. Вместе с тем, не могу не назвать имена тех моих учителей, коллег по работе и совместной деятельности в трибологии, учеников и соратников, без реальной помощи которых настоящий труд вряд ли бы состоялся.

Особая благодарность в то время директорам Института механики металлополимерных систем АН БССР академикам Владимиру Алексеевичу Белому и Анатолию Ивановичу Свиридёнку (ныне Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной Академии Наук Беларуси), которые в течение многих лет способствовали моему становлению как ученого. Многое для меня значили мудрые советы, жизненные подсказки и поддержка профессоров: П. Н. Богдановича, В. А. Гольдаде, Ю. А. Евдокимова, В. И. Колесникова, Б. И. Купчинова, Д. Г. Лина, Н. С. Пенкина, Л. С. Пинчука, Ю. М. Плескачевского, А. В. Рогачева, В. Г. Савкина, П. В. Сысоева, Г. П. Тарикова, А. С. Шагиняна. Благодарю также своих учеников и соратников – к.т.н. И. С. Напреева, С. В. Петрова, к.т.н. А. А. Суслова и других за их увлеченность и труд, который они вложили в наши общие разработки и исследования.

Хочу также выразить благодарность своему сыну – Алексею за его большой труд над реализацией компьютерной версии настоящей книги.

Моя искренняя благодарность Председателю польского трибологического общества, лауреату Большой Международной золотой медали по трибологии профессору Станиславу Пытко, не только ознакомившему меня с достижениями польской трибологии, но и организовавшему совместную работу белорусских и польских триботогов в рамках ряда международных проектов. Хочу также поблагодарить профессоров Януша Янецкого и Марека Вишневского, и особо выразить мою благодарность и признательность профессору Марьяну Шчереку, доктору Витольду Пекошевскому и всем сотрудникам Департамента трибологии Института технологии эксплуатации (Institute for terotechnology) за те незабываемые годы совместной работы.

Автор

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 8
Введение 10

Глава 1. Введение в трибодилатометрию 13
1.1. Современное состояние и тенденции развития трибологии 13
1.2. Диагностика узлов трения 59
1.3. Основные факторы, определяющие изнашивание, дилатацию и деформацию трибосистем 83

Глава 2. Методологические основы трибодилатометрии 125
2.1. Основы теории и терминология 126
2.2. Методики исследования изнашивания и дилатации трибосистем 131
2.3. Факторы, влияющие на точность и воспроизводимость результатов измерений 145
2.4. Статистическая обработка результатов эксперимента 153

Глава 3. Оборудование для исследования изнашивания и дилатации трибосистем 163
3.1. Анализ и систематизация методов трибологических испытаний материалов 163
3.2. Триботестеры 172
3.3. Трибодилатометры 177

Глава 4. Изнашивание и дилатация металлических трибосистем 189
4.1. Узлы трения скольжения сталь–сталь 189
4.2. Узлы трения скольжения сталь–бронза 191
4.3. Особенности изнашивания и дилатации металлических трибосистем 196

Глава 5. Изнашивание и дилатация металлополимерных трибосистем 201
5.1. Монолитные полимерные детали 201
5.2. Полимерные покрытия на металлах 205
5.3. Полимерные покрытия на резиновых уплотнительных элементах 209

5.4. Особенности физико-химических явлений в металлополимерных системах 222
Глава 6. Изнашивание и дилатация эпиламированных трибосопряжений 237
6.1. Влияние технологической наследственности на изнашивание и дилатацию эпиламированных узлов трения 238
6.2. Трение и изнашивание эпиламированных металлических сопряжений 241
6.3. Трение и изнашивание эпиламированных металлополимерных узлов трения 251
6.4. Физико-химические процессы в эпиламированных узлах трения 259
Глава 7. Современное состояние и перспективы развития трибодилатометрии 273
7.1. Трибодилатометрия – состояние, достижения, проблемы 273
7.2. Перспективные направления трибодилатометрических исследований 284
Послесловие 286
Приложение А 289
Краткий трибологический словарь терминов и понятий 289
Приложение Б 305
Б.1. Основные формулы и таблицы математической статистики 305
Б.2. Рекомендуемый порядок действий при обработке результатов прямых измерений износа и дилатации трибосистем: 309
Список литературы 313
Предметный указатель 365
Именной указатель 369

ПРЕДИСЛОВИЕ

Появление белорусской трибологической школы можно определенно связать с именами академика В.А.Белого и профессора И.В.Крагельского. Работы в этой области были начаты в Гомеле в 1952-1955 гг. в Белорусском институте железнодорожного транспорта (ныне БелГУТ), а затем широко развернуты в филиале одной из лабораторий Института надежности и долговечности АН БССР, на базе которой в 1964 г. был создан Отдел, а затем в 1969 г. – Институт механики металлополимерных систем НАН Беларуси. С ростом Института активно развивалось трибологическое направление и ныне белорусская и, прежде всего, гомельская школа трибологов – одна из наиболее известных в мире, вносящая существенный вклад в развитие знаний о трении и износе твердых тел.

В последние 15-20 лет в исследованиях белорусских ученых стали усиленно развиваться направления, связанные с микромеханизмами трения и изнашивания, с установлением взаимосвязи между структурой и трибологическими свойствами твердых тел, полимерных и композиционных материалов (структурная трибомеханика, триботомография, нанотрибология, трибодилатометрия).

К первым белорусским публикациям в области использования дилатометрических свойств для идентификации триботехнических характеристик видимо, можно отнести статьи в журналах: Доклады АН БССР, 1977, т. XX, №6 (О корреляции дилатационных и фрикционных характеристик полимерных материалов) и "Трение и износ" 1987, т. 8, №5 (Устройство для прецизионного измерения износа полимерных материалов).

Эта тематика после названных единичных публикаций нашла серьезное развитие в работах В.Л.Потехи и его ближайших коллег, обобщению которых посвящена настоящая книга. Необходимо подчеркнуть, что эта работа в значительной степени выполнялась совместно с польскими коллегами из Института технологии эксплуатации (Institute for terotechnology) в г. Радоме.

В книге последовательно и комплексно рассмотрены в связи с современными трибологическими достижениями и собственными

исследованиями и разработками основные аспекты научного обоснования использования дилатометрии в исследованиях триботехнических свойств. Определено место трибодилатометрии в трибодиагностике. Приведены примеры эффективного использования научных результатов в трибоизмерительной технике, расширившие ее методические возможности.

Академик **А. И. Свиридёнок**

ВВЕДЕНИЕ

9 марта 1966 года профессором П. Джостом в отчете комитета Министерства науки и образования Великобритании (DES) был впервые использован термин «трибология», который был определен как «наука и технология взаимодействия поверхностей, находящихся в относительном движении, а также связанные с этим явления и их практические следствия» [1, 2]. Фактически это событие может интерпретироваться как реальное начало нового этапа развития трибологии в условиях все более ускоряющегося научно-технического прогресса нашей цивилизации. Признание определяющего вклада трибологии в обеспечение надежной и безопасной эксплуатации самых разнообразных технических средств обусловило включение исследований вопросов трения, изнашивания и смазывания материалов в государственные программы большинства развитых стран мира [3–9].

Быстрое развитие трибологии и, соответственно, связанных с ней смежных областей знания, необходимость систематизации проводимых работ, их оптимизации по экономическому критерию, а также координации международных исследовательских программ потребовали определения актуальных направлений и тенденций развития трибологических исследований [10–12].

В современной трибологии, как области знания, выделяют шесть важнейших развиваемых и перспективных направлений: трибоанализ, трибоматериаловедение, триботехнология, триботехника, трибоинформатика и трибомониторинг [12]. Последний, как известно, состоит из трибометрии и трибодиагностики. Трибометрия, в свою очередь, охватывает методы и средства измерения основных параметров фрикционного контакта и является важнейшим элементом практически всех видов экспериментальных модельных и натурных исследований материалов и триботехники [13–18].

Трибодиагностика – как совокупность методов и средств непрерывного контроля и управления состоянием фрикционных параметров деталей и узлов машин – одно из самых молодых и перспективных направлений в современной трибологии [12, 19, 20]. В связи

с все более повышающимися требованиями к трибологической надежности машин и механизмов особую значимость приобретает разработка новых высокоинформативных методов и средств диагностики узлов трения и, в первую очередь, изнашивания материалов.

В настоящее время при проведении лабораторных исследований и эксплуатации машин используются самые разнообразные способы оценки износа деталей, которые, с известной степенью условности, можно разделить на две группы: методы периодического (с остановкой) и непрерывного (без остановки) контроля состояния трибосопряжений. С точки зрения информативности и универсальности наибольшее распространение получили следующие методы второй группы: акустикоэмиссионные, электрофизические, температурные, виброакустические, спектральные, а также феррографические и магнитометрические. Обладая многими, зачастую уникальными, возможностями эти методы не всегда могут быть использованы для контроля линейных размеров, в частности, так называемых прецизионных узлов трения, т. е. сопряжений, предельная величина износа которых составляет от долей до нескольких микрометров. Во многом это обусловлено тем, что при реализации большинства методик триботехнических испытаний имеет место изменение температуры фрикционного нагрева трибосистем (например, вследствие изменения нагрузочно-скоростных режимов) и, как следствие, изменение их размеров в довольно значительных пределах. Еще одним фактором, негативно влияющим на точность измерения износа, являются радиальные биения фрикционно взаимодействующих элементов трибосопряжений, зачастую имеющие значения в несколько десятков микрометров.

Среди большого разнообразия методов непрерывной оценки износа узлов трения особое место принадлежит методам, основанным на измерении линейных размеров трибосистем или их отдельных элементов. К достоинствам этих методов относятся: сравнительная простота используемых конструкций и методик измерений, малая энергоемкость, сравнительно небольшая инерционность по отношению к процессам фрикционного взаимодействия, возможность сочетания регистрирующих приборов с микропроцессорными устройствами и создания на их базе многофункциональных систем автоматизированного контроля и управления изнашиванием сопряжений. Следует также отметить значительную сложность изучения закономерностей изменения линейных размеров трибосистем, зависящих от большого числа факторов: нагрузочно-скорост-

ных и температурных режимов, конструкции узлов трения, особенностей физико-химического взаимодействия в зоне высокотемпературного контакта материалов, технологии формирования трибоматериалов и др. Реализация потенциальных возможностей указанных методов непосредственно связана с решением целого комплекса проблем и, в первую очередь, с необходимостью разработки их теоретических и методологических основ, а также конструкционно-технологическим обеспечением измерительного процесса. Работы в этом направлении являются достаточно актуальными и перспективными как с точки зрения установления и объяснения новых научных фактов и явлений в трибологии, так и решения конкретных задач прикладного характера, обеспечивающих надежную и безопасную эксплуатацию самых разнообразных, например, транспортных или сельскохозяйственных машин и механизмов.

ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ В ТРИБОДИЛАТОМЕТРИЮ

Чрезвычайно важной особенностью трибодилатометрии является то, что она, являясь составной частью трибодиагностики – относительно молодого раздела трибомониторинга, развивается в рамках всей трибологии, используя при этом ее достижения в фундаментальных и прикладных областях, т. е. динамизм развития трибодилатометрии во многом определяется состоянием и тенденциями развития других трибологических направлений: трибоанализа, трибоматериаловедения, триботехнологии, триботехники, трибоинформатики и, собственно, трибомониторинга. В современной трибодиагностике особая роль отводится диагностическим параметрам, правильный выбор которых во многом определяет эффективность решения той или иной задачи по постановке диагноза потерь энергии, изнашивания или усталостных повреждений трибосистем. Анализ основных факторов, определяющих дилатацию трущихся сопряжений, позволяет более обоснованно осуществлять разработку методологических основ трибодилатометрии.

1.1. Современное состояние и тенденции развития трибологии

Повышенное внимание к проблемам трения и изнашивания, особенно наглядно проявившееся в последние десятилетия XX-го века практически во всех промышленно развитых странах, во многом объясняется той большой ролью, которую трибология стала играть во всех областях жизнедеятельности человечества. В первую очередь это касается технико-экономических проблем обеспечения эксплуатационной надежности самых разнообразных технических и биологических систем, содержащих трущиеся сопряжения, путем снижения их энергопотребления и изнашивания, а также негативных последствий, проявляющихся на всех стадиях жизненного цикла изделий.

Так, например, потери средств в машиностроении развитых государств вследствие износа и трения достигают от 4 до 5 % национального дохода. По оценкам специалистов сопротивление трения поглощает во всем мире от 30 до 40 % вырабатываемой в течение года энергии. Исследования показывают, что до 90 % отказов ма-

шин происходит из-за износа их узлов и деталей, а также рабочего инструмента. За полный цикл эксплуатации машин (комбайнов, вагонов, тракторов, станочного оборудования и др.) эксплуатационные расходы, трудоемкость ремонта и затраты материалов на ремонт в несколько раз превышают затраты на изготовление новых машин. Ремонтом машин и оборудования в развитых странах занято около 30 % общего числа рабочих и примерно такая же часть станочного парка. При этом на ремонт расходуется пятая часть всего выплавляемого металла [21]. По заключению комиссии П. Джоста расходы на трение, износ и смазку могут быть снижены примерно на 20 % только за счет использования научных рекомендаций специалистов-трибологов [1]. Указывается, что наибольший эффект дает не прямая экономия энергии за счет снижения потерь на трение или лучшее использование смазочных материалов, а экономия в процессе эксплуатации и снижение затрат на ремонт и обслуживание машин и механизмов, содержащих узлы трения [22].

В целом сегодня можно констатировать, что трибология превратилась в стратегическую науку, а недостаток трибологических знаний может затормозить, а в некоторых областях совершенно приостановить развитие современной техники.

Анализ научных публикаций и тематики трибологических конференций последних лет, мнения многих ведущих ученых дают основания для выделения в современной трибологии следующих направлений исследований [12]:

- трибоанализ (теоретические положения трибомеханики, физики и химии);
- трибоматериаловедение (изучение и управление свойствами материалов подвижных сопряжений);
- триботехника (совокупность технических средств, реализующих процессы трения и изнашивания);
- триботехнология (технологические методы управления фрикционными характеристиками сопряжений);
- трибоинформатика (совокупность средств и методов обработки и хранения трибологической информации);
- трибомониторинг (совокупность средств и методов диагностики, контроля и испытаний трибосистем).

Трибоанализ – одно из основных направлений трибологии, охватывающее проблемы накопления и систематизации научной информации о фундаментальных закономерностях фрикционных процессов, а также построения моделей этих процессов с целью про-

гнозирования их результатов.

Одним из главных итогов работы последних лет в области триботехнологии является четкая картина процесса трения, охватывающая физические, химические и механические сопутствующие явления. Диалектический подход к анализу предложенной модели и предложенной гипотезы позволил сформулировать и ввести в рассмотрение три последовательных и взаимосвязанных этапа процесса трения, а именно: взаимодействие поверхностей, изменение поверхностных слоев в результате взаимодействия и разрушение поверхностей вследствие двух предыдущих этапов. Эта знаменитая триада И. В. Крагельского легла в основу многих последующих динамических, развивающихся моделей при решении отдельных частных задач как трибоанализа, так и некоторых других разделов трибологии.

В. А. Белый и А. И. Свиридёнок считают, что современный этап развития трибоанализа характеризуется дифференциацией фрикционных явлений, стремлением к познанию глубины процессов, протекающих на взаимодействующих поверхностях, применением эффективных физических, химических и математических методов, вычислительной техники. Достигнут существенный прогресс в понимании природы трения и изнашивания при разнообразных внешних условиях и различных состояниях взаимодействующих поверхностей. В значительной степени этому способствовали достижения в области механики контакта, позволившие определить понятие фактической площади касания твердых тел, оценить напряженно-деформированное состояние и граничные условия, при которых на контактирующих поверхностях протекают разнообразные физические и химические процессы [23–26]. Во многом это стало также возможным благодаря успехам, достигнутым в изучении шероховатости реальных поверхностей, в том числе методов и средств ее измерения, связи с технологическими режимами обработки и закономерностями изменения в процессе эксплуатации машин и механизмов [27–30].

Исследования совместимости трущихся поверхностей, выполненные с участием Н. М. Алексеева, Н. А. Буше с сотрудниками, А. Ю. Ишлинского, И. В. Крагельского, К. Л. Джонсона и других, дали возможность установить существование процессов и закономерностей течения пограничных слоев, пульсации размеров пластической области, а также предложить трехуровневую структуру фрикционной системы, позволяющую объяснить ряд аспектов фрикционного взаимодействия материалов при трении [31–36]. Разработка теории совместимости трибосистем, без сомнения, откроет новые воз-

можности в выборе их оптимальных параметров, обеспечивающих повышение эксплуатационной надежности узлов трения.

Используя современные методы исследования поверхностей, теории нелинейных диссипативных систем и физико-химического материаловедения, трибологи украинской школы: Л. И. Бершадский, В. В. Запорожец, Б. И. Костецкий, П. В. Назаренко, И. Г. Носовский и их коллеги, а также многочисленные ученики и последователи разработали основы общей концепции трибосистемы, реализующей жидкостное, граничное и сухое трение, структурно-динамической классификации диссипативных процессов в узлах трения, поиска вариационных принципов с учетом возникновения вторичной гетерогенности структуры трибосопряжений, адаптивности, структурной (приработочной) памяти и обучаемости трибосистем, общенаучных проблем трибологии [30, 37–40].

Экспериментальные и теоретические исследования электрических явлений, сопровождающих процессы трения и изнашивания материальных сред, проводились под руководством и при участии: Ш. М. Билика, В. А. Гольдаде, Б. В. Дерягина, А. Д. Дубинина, Б. Д. Евдокимова, Ю. А. Евдокимова, А. Ф. Климович, В. И. Колесникова, Б. И. Костецкого, В. С. Миронова, Л. С. Пинчука, С. Н. Постникова, А. И. Свиридёнка, В. Мроз, Т. Катафучи, Н. Такано и др. Установление того, что эффект электризации при трении имеет всеобщий характер, т. е. возникает при всех видах трения и для любых сочетаний контактирующих тел, включая твердое, жидкое и газообразное состояния, сам процесс электризации характеризуется инверсией тока, имеющей множественный характер, тесно связан с физико-химическими процессами и явлением фрикционного переноса в трибосистемах, позволили значительно дополнить и углубить наши представления о природе трения, изнашивания и смазки материалов [41–48]. Новый импульс изучению электрических явлений при трении может дать, например, обнаруженное Ю. А. Берлиным с коллегами явление, заключающееся в том, что в момент пластического течения под давлением в металлах и металлополимерных композитах при движении структурных дефектов возникает направленный перенос электронов, группирующихся вокруг дефектов [49].

Как нам представляется, А. П. Семенов был первым, кто еще в 1953 году при объяснении процесса схватывания металлических пар употребил термин «перенос» материалов [50]. В последующие годы фрикционный перенос исследовали: А. В. Белый, В. А. Белый, Д. Г. Громаковский, А. С. Кужаров, Н. К. Мышкин, А. К. По-

госян, В. Г. Савкин, А. И. Свиридёнок, В. А. Смуругов, В. А. Струк, О. В. Холодилов, С. А. Карпе, Дж. Ларсен-Бассе, С. Норосе, Д. А. Ригни и другие. Получению целого ряда принципиально новых результатов, обогативших трибологическую науку, способствовало использование самых разнообразных современных исследовательских методов: седиментационного анализа и растровой электронной микроскопии [51], эллипсометрии [52], рентгенофлуоресцентного анализа [53], электромагнитной флуктуационной теории молекулярных сил [54]. Было установлено, что процесс фрикционного переноса протекает практически при всех условиях сухого и граничного трения и первоначально происходит от материала с низкой плотностью когезионной энергии к материалу с более высокой плотностью (впоследствии не исключается и обратный перенос, в котором будет принимать участие и материал с более высокой плотностью), толщина переносимых пленок может колебаться от нескольких молекулярных слоев до десятков микрометров и зависит как от свойств элементов трибосистемы, так и нагрузочно-скоростных режимов ее испытаний. Кроме того, характер фрикционного взаимодействия во многом определяется протеканием на границе раздела ряда трибохимических реакций, адгезионным взаимодействием поверхностей контактирующих тел, а управление процессом переноса позволяет существенно улучшить фрикционные и износные характеристики трибосистем [51–62]. Наглядным подтверждением этому является эффект избирательного переноса при трении, открытый Д. Н. Гаркуновым и И. В. Крагельским в 1956 году [63–69].

Можно с уверенностью утверждать, что физико-химические процессы в зоне фрикционного контакта тел стали непреложным атрибутом многих трибологических исследований, начиная примерно с 30 – 40 гг. XX-го века. В разные годы в этих работах принимали участие: С. Б. Айнбиндер, А. С. Ахматов, В. А. Белый, Г. А. Гороховский, И. А. Грибова, Б. Д. Дерягин, Ю. А. Евдокимов, Б. И. Костецкий, И. В. Крагельский, В. И. Колесников, В. В. Коршак, А. П. Краснов, А. С. Кужаров, Ю. М. Плескачевский, П. А. Ребиндер, А. В. Рогачев, В. Г. Родненков, А. И. Свиридёнок, В. А. Смуругов, В. А. Струк, Г. П. Шпеньков, а также Д. Бакли, Д. Б. Кларк, Е. Е. Клаус, Х. Дж. Кецке, Л. Х. Ли и другие. Исследования позволили установить, что в поверхностных слоях трибоэлементов происходят процессы кристаллизации и рекристаллизации (аморфизации), текстурирования [70–74], образова-

ния вторичных структур [30, 37, 38], диспергирования и взаимодиффузии материалов [75, 76]. Характер и интенсивность физико-химического взаимодействия зависят от свойств материалов, образующих трущуюся пару, параметров трения и факторов окружающей среды [77, 78]. Так, например, окисление тонких поверхностных слоев металлов может осуществляться за счет кислорода, растворенного в смазочном материале [79], а образующие трущуюся пару материалы способны выступать в роли ингибиторов или катализаторов окисления смазки с образованием высоко- или низкомолекулярных маслорастворимых соединений [80]. В случае попадания из окружающей среды или выделения газообразного водорода в зоне фактического контакта тел возможно образование гидридных фаз, сопровождающееся значительным объемным эффектом, оцениваемым в его увеличении на несколько десятков процентов [81]. Многообещающим для развития физикохимии трения является установление некоторых аналогий фрикционного динамического и адгезионного статического металлополимерных контактов [82–84].

В настоящее время можно считать установленным, что между трением и колебаниями существует двусторонняя связь: трение порождает колебания, и притом, различных видов, а колебания, в свою очередь, влияют на трение [24, 85–90]. Наибольший вклад в изучение природы, характера протекания и особенностей вибрационных процессов при трении внесли: Ф. Р. Геккер, А. Ю. Ишлинский, В. Ю. Котелевский, И. В. Крагельский, В. А. Кудинов, А. Н. Марюта, А. К. Погосян, А. И. Свиридёнок, В. А. Смуругов, Д. М. Толстой, М. Баркен, А. Левински, В. Ленкевич, Д. Можис, С. Пытко и др. К числу наиболее значимых результатов осуществленных теоретических и экспериментальных исследований относятся: установление связи между фрикционно-износными характеристиками трибосистем, с одной стороны, и нагрузочно-скоростными режимами, частотой и амплитудой как авто-, так и вынужденных колебаний, с другой стороны [91–93]; численное определение частотных характеристик металлических пар трения, зависящих от типа используемого смазочного материала и имеющих порядок 1000 Гц [86, 94]. Несомненный интерес представляют исследования склонности фрикционных пар к виброактивности и разработка динамической модели узла трения [88, 95, 96], а также оценка степени влияния гетерогенности контактирующих материалов на демпфирующую способность трибосопряжений [97].

Исследования, проведенные в 30-х годах XX-го века Ф. П. Боуденом, Н. Л. Кайдановским, С. Э. Хайкиным и, впоследствии, Г. М. Бартеневым, В. А. Белым, И. Э. Виноградовой, Д. В. Конвисаровым, Б. И. Костецким и И. В. Крагельским с сотрудниками и рядом других ученых позволили установить существование периодических изменений силы (коэффициента) трения при испытании трущихся сопряжений самых разнообразных типов [24, 37, 98–104]. В 1936 году был открыт эффект Зибеля–Келя, заключающийся в скачкообразном изменении износа стального образца при изменении скорости скольжения или номинального контактного давления при испытаниях пар трения из железосодержащих образцов на воздухе [105]. Эти данные в последующем были подтверждены результатами исследований В. А. Балакина, О. С. Жеглова, А. С. Кужарова, Б. А. Мадалинова, В. А. Перевознюка, Р. Г. и В. Г. Пинчуков, А. А. Полякова, М. М. Хрущева, Дж. Ведемейера, Р. Марчака, А. Невчака и ряда других ученых [106–123]. Многочисленными исследованиями было установлено существование цикличности структурных параметров поверхностных слоев материалов [24, 113, 114], их электрофизических характеристик [20, 115, 116] поверхностной плотности дислокаций [110, 117], состава смазочных материалов и пленок на поверхностях трущихся тел [118–120], микрогеометрии поверхностей [121], температур в тонком приповерхностном слое материалов [122], концентрации водорода [123], магнитной компоненты электромагнитного излучения в зоне трения [124]. Для описания установленных закономерностей А. В. Бородаем, В. А. Буфеевым и Н. А. Буше, С. В. Крысовым, Б. Авитцуром и др. предложены модели трения, учитывающие волновой (циклический) характер изменения характеристик трибосистем [125–130], а для объяснения механизма фрикционного взаимодействия тел использованы представления «лепестковой» (Н. П. Су) и усталостной (И. В. Крагельский) теорий износа, а также разрушения и восстановления вторичных структур при трении [33, 37, 131, 132].

Особо следует отметить значительные успехи, достигнутые в вопросах разработки теоретических основ моделирования процессов фрикционного взаимодействия материалов, включая задачи оптимального планирования лабораторных и промышленных экспериментов, а также использования полученных результатов для решения конкретных практических задач: разработки методик расчета сопряжений на изнашивание, оптимизации работы подшипниковых узлов, тормозных систем и др. Наибольший вклад в развитие этого

раздела трибоанализа внесли: Э. Д. Браун, В. А. Войтов, В. В. Гриб, Ю. Н. Дроздов, Ю. А. Евдокимов, С. М. Захаров, И. И. Карасик, Б. Г. Кеглин, В. И. Колесников, Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец, А. В. Рогачев, А. И. Свиридёнок, Ю. В. Скорынин, С. А. Чижик, А. В. Чичинадзе, М. Годе, Г. К. Х. Зум, Г. Польцер, А. Рац и др. [21, 69, 133–157].

Отличительной особенностью современного этапа развития трибологии является постоянно увеличивающееся число работ, в которых процесс фрикционного взаимодействия тел изучается на атомном или молекулярном уровне. Этот процесс происходит на фоне рассмотрения проблем и конкретизации задач традиционной макротрибологии [158].

Сегодня уже можно говорить о существовании новой перспективной области исследований – нанотрибологии, развитие которой идет по пути создания новых миниатюрных конструкций узлов трения, изучения свойств тонких смазочных пленок в зазоре между контактирующими трибоэлементами, природы атомных и молекулярных взаимодействий трущихся материалов [26, 159–163].

Трибоматериаловедение – раздел трибологии, предметом которого являются строение и свойства материалов, используемых в сопряжениях, характеризующихся диссипацией энергии в зоне фрикционного контакта тел.

В рамках трибологии этот раздел непосредственно связан с трибоанализом, а также комплексом знаний, составляющих научные основы триботехнологии и триботехники. В широком смысле слова все трибоматериалы являются композиционными, т. е. состоящими из основы и некоторого набора компонентов (ингредиентов), вводимых в нее для целенаправленного придания изготавливаемым деталям тех или иных служебных свойств. Другими словами, композиционными являются материалы, состоящие из двух или более компонентов (фаз), между которыми имеется граница раздела.

На сегодняшний день не существует какой-либо единой общепринятой классификации материалов, в том числе и материалов, используемых в триботехнике. Отдельные классификации могут осуществляться по свойствам, определяющим выбор материала для конкретных деталей конструкций, их назначению, химическому составу, способу производства, условиям эксплуатации, составу компонентов, параметрам и ориентации наполнителей и др. [164–168].

Характерной особенностью научно-исследовательских работ, посвященных созданию новых триботехнических материалов в пос-

ледние десятилетия двадцатого века, является стремление использовать как традиционные, так и принципиально новые типы связующих (матриц), а также высокоэффективных наполнителей (компонентов) [165–167, 168–175]. При этом последние используются в виде порошков, волокон, нитевидных кристаллов, чешуек, лент и тканей, а также в жидкой или газообразной фазах [171, 172, 176–179]. Большое внимание уделяется выбору оптимального вида, количества и свойств наполнителя, способам его поверхностной обработки и специфическим особенностям взаимодействия на границе раздела фаз [179–189]. Основные тенденции исследований, по-видимому, формируются с учетом общих требований, предъявляемых к триботехническим материалам [24, 38, 61, 190, 191].

Значительный вклад в развитие общих принципов создания композиционных материалов, используемых в трущихся сопряжениях машин, внесли: Д. Т. Авдеев, С. Б. Айнбиндер, В. Н. Анциферов, В. А. Белый, А. А. Берлин, П. Н. Богданович, Э. Д. Браун, Н. А. Буше, Ю. Н. Васильев, В. И. Врублевская, В. А. Гольдаде, И. А. Грибова, Ю. Н. Дроздов, Ю. А. Евдокимов, Р. Н. Заславский, Ю. С. Заславский, В. Д. Зозуля, Ю. Л. Ищук, К. И. Климов, В. В. Коршак, А. П. Краснов, В. К. Крыжановский, А. С. Кужаров, А. М. Кулиев, Б. И. Купчинов, А. А. Кутьков, В. Л. Лашхи, Р. М. Матвеевский, Н. К. Мышкин, Д. В. Орлов, С. С. Песецкий, Л. С. Пинчук, Ю. М. Плескачевский, А. К. Погосян, Ю. А. Радин, В. Г. Родненков, В. Г. Савкин, А. И. Свиридёнок, А. П. Семенов, В. А. Струк, П. В. Сысоев, И. М. Федорченко, Г. И. Фукс, А. В. Чичинадзе, Н. С. Айсс (мл.), М. Биллитт, Д. Кламанн, Дж. С. Пратт и др. [105, 119, 164, 166, 169, 179, 182, 184, 192–219].

Наибольшее распространение в самых различных областях жизнедеятельности человека получили материалы на основе металлов, полимерных связующих, керамики, угле- и графитопластов, разнообразных смазочных сред и составов.

Металлы по-прежнему остаются одними из самых распространенных материалов триботехнического назначения. Основные исследования ведутся в направлении совершенствования их служебных характеристик путем разработки структурных критериев модифицирования, основных положений совместимости при контактировании с различными материалами в узлах трения, имеющих отличающиеся как объемные, так и поверхностные свойства, например, вследствие использованной технологии поверхностной упрочняющей об-

работки, вида смазочного материала и способа его подачи в зону фрикционного контакта и др.

Кроме многих, ставших уже традиционными, методов улучшения антифрикционных свойств материалов на основе железа [166, 168], в последние десятилетия был предложен ряд новых материаловедческих решений, обеспечивших дальнейшее повышение надежности трибосистем. Во многих случаях достижение желаемого эффекта осуществлялось путем введения в состав материалов новых компонентов, например, редкоземельных металлов или оптимального соотношения компонентов в создаваемом композиционном материале [220–222], а также повышения чистоты (исключения вредных примесей) подшипниковых сталей [223]. Значительно возрос интерес к исследованиям антифрикционных и фрикционных материалов, полученных путем спекания металлических порошков железа, содержащих легирующие элементы и различные функциональные добавки [224–227]. По-прежнему остаются актуальными исследования, направленные на совершенствование свойств чугунов путем их комплексного легирования [228, 229]. Для этого в качестве модификаторов используют свинец, хром и ванадий, медь, керамику, фосфор, титан и некоторые другие элементы [230]. Отдельными экспериментами показана перспективность улучшения свойств чугунов путем оптимизации формы графитной составляющей [231].

Подшипниковые узлы, изготовленные с использованием алюминиевых сплавов, достаточно широко используются в самых различных технических устройствах и системах [72, 85, 190, 193, 232–236].

Анализ публикаций последних лет показывает, что значительное улучшение антифрикционных свойств материалов на основе алюминия может быть достигнуто при использовании в качестве легирующих добавок олова, кремния, меди, свинца, талька, графита, двуокиси кремния, нитевидных кристаллов карбида кремния [234, 236–239]. Представляется, что определенные перспективы использования в триботехнических целях имеют алюминиевые сплавы типа «металлического стекла», отличающиеся комплексом уникальных физико-механических свойств [240].

Являясь исторически традиционным подшипниковым материалом, сплавы на основе меди и до настоящего времени не утратили своего значения и по-прежнему довольно широко применяются в подвижных сопряжениях самых разнообразных машин и механизмов [166, 232]. Наиболее перспективные направления исследований последних лет были сосредоточены на использовании меди и ее спла-

вов в качестве самостоятельных покрытий или элемента (подслоя, наполнителя) покрытий из композиционных металлических и металлополимерных материалов [105, 212, 242]. Практически самостоятельными материаловедческими направлениями становятся разработка композитов на основе меди и графита [243–245], а также относительно нового типа материалов, так называемых медных порошковых «псевдосплавов» [246, 247]. Установление в 60-х годах двадцатого столетия Д. Н. Гаркуновым и И. В. Крагельским (научное открытие № 41, зарегистрированное в СССР в 1964 году) эффекта избирательного переноса при трении обусловило небывалый рост числа исследований этого явления и, как следствие, расширение областей и форм практического применения меди и ее соединений в триботехнике [63–68, 119, 120, 209, 248,249].

Для совершенствования сплавов на основе свинца и олова (баббитов) используется ряд как традиционных, так и оригинальных методов, преследующих в своем большинстве главную цель – повысить усталостную прочность материалов [72, 166, 168, 190, 232, 251]. Для этого в качестве легирующих элементов используют графит, цинк, дисульфид молибдена, лигатуру SbSe40, индий, селен или теллур и другие модификаторы [252]. Для материалов с цинковой матрицей наиболее часто используемым модификатором является алюминий [253].

Практически только в 90-х годах двадцатого века были опубликованы первые основополагающие работы, обобщающие результаты исследований, в том числе и принципиально нового типа трибокомпозитов – аморфных металлических материалов (стекол) [240, 254, 255]. Результаты исследований представляются достаточно перспективными как с точки зрения дальнейшего развития теории трибологии, так и использования полученных данных в практических целях.

Композиционные материалы с полимерной матрицей отличаются от материалов на металлической основе комплексом улучшенных свойств: более высокой во многих случаях удельной прочностью, лучшими демпфирующими характеристиками и большей технологичностью. Это, в свою очередь, позволяет использовать при создании композитов широкую гамму исходных материалов (связующих и наполнителей) и, соответственно, получать материалы с заданными эксплуатационными характеристиками [105, 165, 179, 189, 194–196, 199–202]. Общеизвестны исследования и практические разработки в области трибоматериалов на основе полимеров, выполненные учеными белорусской школы, созданной В. А. Белым. В России ра-

боты в этом направлении ведутся коллективами ученых под руководством Ю. С. Заславского, А. П. Краснова (школа В. В. Коршака), И. Н. Черского. Кроме того, эффективно работают в данном направлении трибологи из Армении, возглавляемые А. К. Погосяном, сотрудники ряда украинских научно-исследовательских институтов и центров: А. И. Буря, Ю. С. Липатов, Д. Д. Ремизов и др. Интересные результаты получены польскими трибологами: С. Пытко, З. Римузой, Я. Янецким. Ряд результатов оригинальных исследований в области трибоматериаловедения, выполненных интернациональными коллективами ученых, представлены в монографиях, вышедших под редакцией Л. А. Карлссона и К. Фридриха, а также в некоторых других публикациях и обзорах [77, 105, 165, 179, 194, 199–201, 203, 216, 256–260].

В качестве матрицы композиционных трибоматериалов используются синтетические и природные органические и неорганические полимеры, а также их смеси, термопластичные и термореактивные полимеры, в частности: полиамиды, поликарбонат, полибутилентерефталат, эпоксидные смолы, синтетические каучуки, полифенилхиноксалин, полифениленсульфид, кремнийорганические и фенол-кремнийорганические смолы, полимер сложного эфира кетона и некоторые другие материалы [261–263]. В качестве наполнителей применяются практически все типы волокон, нитей, усов, тканей, дисперсных частиц, например, порошки металлов (медь, алюминий, олово, цинк, свинец, бронза, латунь) и их оксиды, металлокерамика, дисульфид молибдена, графит, добавки, аккумулирующие смазочный материал, легкоплавкие металлы и сплавы и др. [176–178, 264, 265]. Весьма перспективным является использование в качестве наполнителей совместимых и несовместимых с материалом основы полимерных материалов, т. е. создание смесей полимеров, обладающих, зачастую, уникальными фрикционными свойствами [105, 218, 266–268]. В конце 90-х годов двадцатого века появились сообщения о разработке новых конструкционных материалов и покрытий на основе «гибридных» полимерных структур, позволяющих снизить коэффициент трения и, примерно, вдвое повысить износостойкость трибосистем при температурах свыше 573 К [269]. Эффективным путем улучшения служебных свойств полимерных композиционных материалов триботехнического назначения является оптимизация качественных и количественных показателей используемых наполнителей [180, 189, 256, 266, 270, 271].

Полиамиды являются полимерами, по-видимому, наиболее хорошо изученными и широко используемыми в триботехнике. Антифрикционные характеристики полиамидов регулируют путем введения в их состав дисперсных минеральных наполнителей (графит, медь или ее оксиды и соли), органических модификаторов (пластификаторы, олигоорганосилан), волокон и нитей (стеклянные, арамидные, углеродные), высокомолекулярных веществ (полиолефины, политетрафторэтилен, поливиниловый спирт) и др. [105, 272–274]. Ужесточение требований к создаваемым материалам обусловливает необходимость включения в их состав комплекса различных наполнителей, совместно обеспечивающих достижение требуемого эффекта [275].

Уникальные свойства фторопластов обеспечили им широкое применение в самых различных конструкциях узлов трения, в том числе и работающих без смазочного материала, при низких температурах, в инертных газовых средах и вакууме [167, 212, 276–278]. Некоторые наполнители полимерных композиционных материалов, о которых уже упоминалось ранее, используются также и для повышения износостойкости и снижения коэффициента трения фторопластов [279, 280]. Вместе с тем, в последние годы разработан ряд новых эффективных методов модифицирования фторопластов, например, продуктом химического взаимодействия эпоксидной смолы, натриевого жидкого стекла и хлорного железа [281], ингибиторами коррозии [282], ультрадисперсными (размер частиц от 0,1 до 0,5 мкм) оксидами и нитридами металлов [283]. Перспективны для использования в триботехнике тонкослойные фторопластовые покрытия [284, 285].

Композиционные материалы на основе эпоксидных смол отличаются своей универсальностью и технологичностью, хорошими антифрикционными характеристиками. Это в ряде случаев делает их совершенно незаменимыми для решения большого числа самых разнообразных триботехнических задач [194–197]. Анализ имеющейся у нас информации свидетельствует, что основные исследования и разработки по созданию композиционных материалов на основе эпоксидных смол, в основном, совпадают с общими тенденциями современного трибоматериаловедения. Так, в качестве наполнителей полимерной матрицы применяются твердые смазки (графит, дисульфид молибдена, нитрид бора и др.), дисперсные металлы и их соединения (оксиды металлов, сплавы на основе меди, неорганические и органические соединения меди, карбиды), полимеры (полиэтилен исходный и пластифицированный минеральным маслом, поли-

амиды, поливиниловый спирт), волокна и ткани (углеродные, стеклянные, полимерные и др.) [167, 197, 286–288]. Вместе с тем, хотелось бы отметить, что по нашему мнению возможности использования эпоксидных смол в качестве основы композиционных материалов триботехнического назначения далеко не исчерпаны. Примером этому являются разработки материалов, реализующих при трении эффект избирательного переноса [289] и использующихся в виде тонких покрытий деталей цилиндропоршневой группы двигателей внутреннего сгорания [290].

Древесно-полимерные композиции – особый класс материалов, бурное развитие и совершенствование которых, начавшееся в середине двадцатого века, продолжается с не меньшей интенсивностью и сегодня. Это подтверждается многочисленными публикациями о результатах трибологических исследований материалов и их практическом использовании в самых разнообразных отраслях промышленности и сельского хозяйства [105, 166, 189, 199, 291, 292]. Специфические свойства древесины и, в первую очередь, капиллярно-пористое строение во многом обусловливают и выбор вводимых в нее модифицирующих компонентов: минеральных масел, кремнийорганических жидкостей, водорастворимых соединений металлов, суспензий фторопласта, дистиллированных жирных кислот и их солей, термопластичных полимеров, сплавов легкоплавких металлов и др. [292–294].

Низкая адгезионная способность, удовлетворительная механическая прочность, химическая инертность и технологичность переработки в изделия практически всеми известными способами позволяют использовать полиолефины для решения конкретных триботехнических задач, в том числе и в качестве основы антифрикционных материалов. Традиционно используемые в трибоматериаловедении методы модифицирования композитов на основе полиолефинов представлены в работах [105, 167, 182]. Кроме них отметим наиболее интересные, с нашей точки зрения, материаловедческие решения. Практически самостоятельным научным направлением стало радиационно-химическое модифицирование полимеров (полиэтилена, полиамидов и др.), позволяющее управлять их триботехническими характеристиками [201]. В широких пределах регулировать фрикционные свойства материалов можно путем пластификации полиэтилена с минеральным маслом и создания пористых материалов (полиэтилен, полипропилен, сополимеры этилена или пропилена с другими мономерами), закрытые поры которых заполнены жидкой

смазкой [295].

Впервые использованная как подшипниковый материал в судостроении в 20-х годах двадцатого столетия резина и в настоящее время сохраняет свои позиции в триботехническом материаловедении [166, 200, 297–299]. Безусловно, наибольшее применение она находит в герметологии [200, 299, 300]. В качестве основы резин используют натуральные и синтетические каучуки. В настоящее время обозначились три основных группы методов улучшения свойств материалов на основе резины: применение новых и улучшение традиционно используемых типов связующих, объемная модификация матриц органическими и неорганическими компонентами, поверхностная модификация изделий полимерными покрытиями [301–306]. В ряде случаев оптимальные результаты получают при совместном использовании разных методов модификации резиновых материалов [305].

Материалы на основе сополимеров формальдегида, пожалуй, одними из первых стали применяться для изготовления деталей трения. Уникальные свойства полимеров позволяют с высокой эффективностью использовать их для получения как антифрикционных, так и фрикционных полимерных материалов [105, 167, 257, 265, 307, 308]. При этом в качестве наполнителей композиций применяют целлюлозу, смесь графита с антрацитом, мел, органические и неорганические волокна, гексаметилентетрамин, тальк, силиконовое масло и ряд других материалов [257, 309, 310]. Материалы на основе сополимеров формальдегида могут эффективно использоваться как для изготовления монолитных деталей трения, так и в виде тонкослойных покрытий трущихся поверхностей.

Ряд полимерных материалов используется для решения конкретных триботехнических задач, например, обеспечения работоспособности узлов при повышенных температурах (полиимиды), УФ-излучении и резком перепаде температур окружающей среды (поликарбонаты), необходимости уплотнения сопряжений, работающих в условиях динамического нагружения (анаэробные герметики), надежной защиты деталей при абразивном изнашивании (полиуретаны) и др. [167, 311–314].

Дальнейший прогресс в разработке трибоматериалов на полимерной основе, по-видимому, будет связан с созданием теории молекулярного взаимодействия композитов [184], разработкой новых способов введения наполнителей в матрицу [315, 316], комбинированным использованием современных методов поверхностного и

объемного модифицирования [305, 306], применением электрических и магнитных полей для управления свойствами материалов [317, 318] и др.

Керамические материалы благодаря своей сверхвысокой твердости, низкой плотности, повышенной коррозионной стойкости и термостойкости, технологичности, хорошим антифрикционным свойствам в последние десятилетия двадцатого века являются предметом большого числа трибологических исследований и практических разработок [319–325]. Наибольшее внимание уделяется материалам на основе карбидов кремния, титана и вольфрама [326, 327], оксидов алюминия и циркония [328–331], нитридов кремния и бора [332–334]. Проведенные исследования позволили установить существенное влияние твердости керамики на ее износостойкость [322]. Трещинообразование, пластическая деформация, химические превращения и другие процессы, сопровождающие износ композитов, во многом определяются структурой керамических материалов [326, 335], а преобладающий механизм изнашивания – температурой испытаний и сочетанием материалов (сталь–керамика, керамика–керамика) трущихся пар [329, 336]. Особо отмечается влияние технологии формирования покрытий [337] и факторов окружающей среды на трение и изнашивание керамических композитов [331, 333, 334].

Указывается, что совершенствование материалов должно вестись в направлении снижения их хрупкости, а при использовании в качестве покрытий – уменьшения различия коэффициентов теплового расширения деталей пары керамика–металл [338]. Весьма многообещающими являются исследования по созданию стеклокерамических материалов [339], а также принципиально нового класса материалов – древокерамики [340].

Углеграфитовые материалы занимают свое вполне определенное место в трибоматериаловедении. Научное и технологическое значение этих материалов непрерывно растет благодаря их высокой химической стойкости, термо- и износостойкости, относительно небольшой плотности и отсутствию в составе канцерогенных компонентов [166, 341, 342]. Углеграфитовые материалы с высокой эффективностью используются в тяжелонагруженных узлах трения, например, тормозных устройствах транспортной техники, а также некоторых биосистемах [174, 257, 342, 343].

Углеродная матричная фаза может состоять как из стекловидного изотропного углерода, так и из высококристаллического графита с практически неограниченными возможностями изменения их струк-

туры и, соответственно, свойств. В качестве связующих компонентов при создании углеграфитовых трибокомпозитов чаще всего используют термопластичные и термореактивные полимеры: эпоксидные и фенолформальдегидные смолы, полиамиды, полифениленсульфид и др. [343–345], в качестве наполнителей – различные типы дисперсных материалов и углеродных волокон в форме нитей, тканых материалов и т. д. с определенной формой ориентации относительно поверхности трения [342, 343, 346, 347]. Значительное количество исследований посвящено влиянию природы армирующего наполнителя, его совместимости с матрицей и оптимальному содержанию в композиции [187, 342, 346, 348, 349].

Весьма перспективным является модифицирование углепластиков волокнами политетрафторэтилена [350], а также включение в состав матрицы материала стержней из металлов, имеющих хорошие антифрикционные свойства (висмут, свинец или цинк) [351]. Достаточно интересными являются результаты исследований трибокомпозитов, имеющих в сечении градиент концентрации графитового наполнителя [352], и изготовленных путем пропитки углеродсодержащих материалов фосфатами металлов (алюминия, цинка, марганца и др.) [353, 354].

Смазочные материалы, уже более четырех тысячелетий используемые человеком для снижения трения и изнашивания самых различных подвижных сопряжений, прошли достаточно большой путь в своем развитии – от животных жиров и растительных масел к минеральным и нефтяным смазкам и современным синтетическим композициям и составам. Анализ имеющихся в нашем распоряжении литературных источников [68, 119, 166, 198, 203–207, 209–211, 355–359] показывает, что наибольшая доля исследований и практических разработок посвящена моторным маслам, пластичным, твердым и магнитным смазочным материалам, смазочным составам на водной основе, растительным смазочным материалам. Достаточно часто в отдельные группы выделяют металлоплакирующие (реализующие эффект избирательного переноса) масла и смазки, приработочные смазочные составы, смазочные материалы для металлополимерных пар трения, смазки для электроконтактов и др.

В качестве основы моторных масел, в основном, используют минеральные (нефтяные) и синтетические (кремнийорганические и фторуглеродные жидкости, некоторые синтетические жидкие углеводороды) масла [166, 206, 210, 360]. Синтетические смазочные материалы получают все большее распространение благодаря своей повы-

шенной стойкости к окислению и старению, способности обеспечить высокую износостойкость и коррозионную стойкость узлов трения [361].

В качестве модификаторов (присадок, наполнителей и загустителей) моторных масел применяют большую гамму самых разнообразных веществ, позволяющих с максимальной эффективностью решать поставленные задачи по обеспечению трибологической надежности узлов трения. Так, например, базовые масла модифицируют графитом, дисульфидом молибдена и молибденсодержащими присадками, порошкообразными металлами и их неорганическими солями, в том числе меди, металлополимерными присадками, органическими металлсодержащими соединениями, синтетическими жирными кислотами и их солями, исходными и подвергнутыми γ-облучению полимерами (политетрафторэтиленом, полиэтиленом, полибутадиеном, полипропиленом и др.), продуктами термической деструкции полиолефинов, карбонофторидом, жидкими кристаллами, металлизированной древесиной, комплексными многофункциональными присадками [75, 185, 198, 360, 362–371]. Достаточно интересными являются исследования по разработке так называемых полужидких смазок [372], в ряде случаев позволяющих повысить работоспособность узлов трения.

Ряд современных ученых-материаловедов, например, [166], относят к смазочным материалам, кроме моторных, трансмиссионные и индустриальные масла, которые в последние годы также подвергаются непрерывному совершенствованию и ассортиментному обновлению [206, 360].

Несомненными достижениями последних десятилетий двадцатого века в материаловедении являются создание и широкое практическое использование трибополимеробразующих присадок к смазочным средам [203, 204], смазочных масел для металлополимерных пар трения [373] и электроконтактных смазок [211, 374–376].

Систематизация научной информации и результатов практического использования пластичных смазочных материалов, по-видимому, впервые представлена в отечественной литературе монографиями Д. С. Великовского с коллегами [377, 378]. Впоследствии этой тематике были посвящены работы [205, 206, 210, 356, 357, 379, 380]. По сравнению с жидкими маслами, пластичные смазочные материалы отличаются высокой адгезионной способностью, не вытекают из подшипникового узла, а герметизируют его, защищая от пыли и влаги, повышенной работоспособностью, экономичностью в эксплуа-

тации, простотой конструкционного исполнения сопряжений и их технического обслуживания и др. Основные недостатки пластичных смазочных материалов: высокое внутреннее трение и отсутствие эффективной теплопередачи, необходимость разборки сопряжений при контроле их состояния устраняются как путем совершенствования конструкции узлов, так и состава смазочных композиций. Последнее может быть осуществлено путем выбора соответствующей основы и компонентов смазочных материалов. Так, в качестве основы пластичных смазок используют минеральные и синтетические масла, парафин, полиэтил- и полифенилметилсилоксановые жидкости, разнообразные масла и составы растительного происхождения и др. [381–382].

Основы (матрицы) пластичных смазок модифицируют солями жирных кислот, фенилсодержащими силиконовыми жидкостями, ультрадисперсными порошками металлов, металлизированной древесиной, сверхпластичными металлическими сплавами, фторированным углеродом, неорганическими и органическими солями меди и цинка, твердосмазочными и трибополимеробразующими добавками, стеклянными микросферами, фуллереном C_{60} (углерод в виде многоатомных кластеров), порошковыми и жидкофазными полимерными материалами и др. [204, 362, 381, 383–388]. Очень часто оптимальный состав пластичного смазочного материала содержит несколько различных модифицирующих компонентов [389] и разрабатывается для конкретных конструкций трущихся сопряжений: шлицевых и резьбовых соединений, уплотнений и др. [359, 360, 390].

Уже более ста лет известно, что графит, дисульфид молибдена и некоторые другие неорганические вещества, имеющие слоистую структуру и названные твердыми смазками, обладают исключительной смазочной способностью. Твердые смазки произвели настоящую революцию в самых разнообразных областях техники, так как позволили решить многие задачи по созданию более надежных машин, предназначенных для эксплуатации в очень сложных, зачастую экстремальных, условиях (низких или высоких температурах, криогенных установках, вакууме, малых скоростей и больших давлений, инертных газов, воздействия ионизирующих излучений и др.) [176, 391–393].

Обобщающие сведения о классификации, исследованиях и практическом использовании твердых смазок представлены в работах [38, 72, 85, 167, 202, 203, 206, 210, 212, 360, 391–394]. Твердые смазочные материалы могут использоваться в трибосопряжениях машин и ме-

ханизмов в виде блочных монолитных деталей, тонкослойных покрытий, мелкодисперсных веществ, суспензий и др. Отметим лишь отдельные, наиболее важные с нашей точки зрения, результаты исследований. Ряд оригинальных работ посвящен изучению природы смазочной способности графита и некоторых других твердых смазок [202, 395, 396], оценке влияния режимов трения и параметров среды на триботехнические свойства сопряжений [393, 397], попыткам объяснить механизм действия твердосмазочных материалов [203, 398, 399].

Твердые смазки могут сами являться основой, на базе которой создаются композиционные смазочные материалы [209]. Кроме того, в качестве матрицы таких материалов могут применяться капролактам [400], синтетические масла и органические полимеры [135, 401, 402], легкоплавкие металлы и сплавы [202].

Твердосмазочные композиции получают, вводя в основу дисульфиды молибдена и вольфрама, графит, фтористый кальций, полиорганосилоксаны, селен, легкоплавкие металлы и их сплавы, дихалькогениды тугоплавких металлов [391, 392, 403, 404]. Однако наилучшие результаты, как правило, получают при использовании различных комбинаций модификаторов, вводимых в основу твердой смазки [405–407]. Очень часто использование смесей твердых смазочных веществ, благодаря явлению синергизма, позволяет получать композиции с уникальными антифрикционными свойствами [408, 409].

Следует отметить некоторые перспективные идеи и разработки в области твердосмазочных материалов. Так, в противоположность механическим смесям, интеркаляционные соединения MoS_2 с гетероциклическими соединениями (фенантролин, бипиридил) позволяют получать материалы с высокой термомеханической стабильностью [410]. Все большее распространение, особенно в прецизионных парах трения, получают сверхтонкие (менее 1 мкм) твердосмазочные покрытия [411]. Несомненное будущее имеет новый тип твердых смазок в виде ретикулированных полимерных губок заданного профиля, микропоры которых заполнены (до 80 % мас.) смазочной композицией требуемого состава [412].

Создание магнитных смазочных материалов стало возможным благодаря большому прогрессу коллоидной химии и физикохимии поверхностных явлений, и явилось большим достижением материаловедческой науки конца двадцатого века [413–415]. Применение магнитоактивных сред в трибосопряжениях машин может осуществляться в форме магнитных жидкостей и магнитопорошковых сма-

зочных материалов. В качестве основы магнитных жидкостей триботехнического назначения используются минеральные и синтетические масла, фторуглероды, эфиры, силиконы, различные растворители, дизельное топливо, вода и др., а в качестве дисперсной фазы — наночастицы железа, никеля, кобальта, феррита железа (магнетита), как в отдельности, так и в сочетании с другими функциональными добавками: поверхностно-активными веществами, твердыми смазками и др. [416, 415].

Исследования триботехнических свойств магнитных смазочных жидкостей позволили установить, что магнитное поле оказывает слабое влияние на коэффициент трения сопряжений, в то время как средняя величина износа при этом может несколько уменьшаться [418]; антифрикционные свойства ферромасел, в первую очередь, определяются базовым маслом и незначительно изменяются с введением дисперсных частиц [419]. Отмечается, что при эксплуатации узлов трения, смазываемых ферромаслами, необходимо учитывать изменение магнитных свойств последних и не допускать работу узла в экстремальных условиях, приводящих к потере коллоидной стабильности ферромасел [417].

Магнитные смазочные композиции все более широко используются в узлах трения, работающих в особых условиях, где обычные смазки неприменимы, выполняя при этом роль как смазочных, так и уплотнительных материалов [420]. Считают, что нагрузочная способность и эксплуатационные характеристики опор с магнитной жидкостью могут быть существенно повышены за счет оптимизации свойств смазочного материала и конструкции трущихся сопряжений [421, 422].

Магнитный способ подачи порошковой смазки в узлы сухого трения предложен российскими учеными Ю. Н. Дроздовым и В. Г. Павловым. Перспективность магнитного метода смазывания по сравнению с другими методами определяется, прежде всего, возможностью повысить ресурс работы механизмов за счет увеличения объема смазочного материала, циркулирующего в узле трения в процессе его работы; лучшим удержанием смазочного материала на поверхностях трения за счет магнитного поля; возможностью многократной подачи одних и тех же частиц смазочного материала при их отрыве от поверхности трения; регулирования смазывания [142, 175, 423].

Магнитно-порошковый метод достаточно универсален и может быть применен к узлам трения различного типа: зубчатым колесам,

подшипникам скольжения и качения, кулачковым парам и т. д. В качестве магнитно-активных смазок используются составы на основе дисульфида молибдена и никеля, кобальта и специальных ферритов [424, 425]. Работоспособность смазочных материалов определяется физико-химическими свойствами магнитных составляющих (точка Кюри, кристаллическая структура, химическая активность), а также оптимальным соотношением смазочного и магнитного компонентов композиций [425].

Смазочные материалы на водной основе обладают рядом уникальных свойств: малой вязкостью, высокой теплоемкостью, пожаробезопасностью, отсутствием негативного воздействия на окружающую среду, незначительным образованием и отложением продуктов термического разрушения, что делает их практически незаменимыми для использования в узлах жидкостного трения [68, 85, 175, 426, 427]. Антифрикционные свойства водосодержащих смазочных композиций зависят от природы модифицирующих компонентов, толщины пленки смазки и трибохимических процессов в зоне фрикционного контакта тел [428]. Смазывание металлополимерных сопряжений водой может приводить как к улучшению, так и ухудшению их фрикционных и износных характеристик [429–431]. В качестве компонентов смазочных жидкостей на основе воды используют ингибиторы коррозии, водорастворимые полимеры для регулирования вязкости композиций, амины, полисилоксаны, минеральное масло и др. [427, 428, 432, 433].

Дальнейший прогресс в деле создания новых высокоэффективных смазочных составов на водной основе может быть связан с более глубоким познанием природы воды как основы смазочных материалов [434, 435].

Защита окружающей среды от негативного воздействия технических масел в настоящее время осуществляется путем сокращения их потерь при работе устройств, развития методов очистки и переработки отработанных составов, а также создания смазочных материалов безвредно разлагающихся при утилизации [436, 437]. В последнем случае все большее применение получают масла растительного происхождения, используемые как основы или компоненты разрабатываемых смазочных композиций. Такие смазочные материалы, изготавливаемые на основе масел, полученных из семян льна, сои, сафлора, рапса, хлопка и некоторых других растений, отличаются нетоксичностью, пожаро- и взрывобезопасностью (отсутствие упругости пара обеспечивает температуру воспламенения в диапа-

зоне от 553 до 568 К), лишены канцерогенных и мутагенных свойств [437, 438]. Сульфирование растительных масел, а также введение в них специальных добавок (антиоксидантов, стабилизаторов) позволяют получить составы, не уступающие, а в ряде случаев даже превосходящие по качеству некоторые минеральные смазочные материалы [439].

Безопасные для окружающей среды технические жидкости на растительной основе могут найти широкое применение в ряде силовых гидросистем, а также в качестве смазочных материалов для тяжелонагруженных зубчатых передач, двигателей внутреннего сгорания и некоторых других трибосопряжений и механизмов. Устранение возможности биологического повреждения и попадания влаги в смазочные материалы позволяет улучшить их служебные характеристики и, соответственно, расширить области практического использования [440].

В завершение анализа современного состояния трибоматериаловедения отметим некоторые перспективные, с нашей точки зрения, направления развития исследований. Важным шагом в создании прогрессивных материаловедческих решений в трибологии является признание того, что смазочный материал представляет собой совершенно определенный конструкционный элемент машин и механизмов [441] и последующее распространение этого принципа на все типы триботехнических материалов. Несомненные перспективы имеют применение матричного синтеза для создания полимерных трибокомпозитов [442], использование так называемой трибохимической смазки узлов трения [443] и энергетическая активация трибоматериалов [444]. Мы вправе ожидать интенсивного роста научно-исследовательских работ в области наноматериалов [445–447] и создания композиций, заданным образом трансформирующих свою структуру в процессе трения [448]. Можно предполагать, что при создании материалов XXI века будут широко использоваться природные прототипы, в частности, растительные, имеющие иерархически градиентную структуру [449], а также ткани живых органов с их трехмерной микросетчатой структурой (такие материалы получили название мункусы: MNCS – Micro Network Controlled Structure) [450]. По-видимому, ученые-материаловеды будущего смогут по достоинству оценить возможность применения искусственного нейрона и искусственной нейронной сети для моделирования поведения и разработки новых интеллектуальных материалов [451].

Триботехника – раздел трибологии, включающий в себя комп-

лекс технических средств, методы их расчета, конструирования и оптимального практического использования.

Следует отметить, что триботехнике принадлежит исключительно важная роль в деле обеспечения надежности трущихся сопряжений, так как подавляющее большинство (от 50 до 70 %) всех дефектов машин и механизмов непосредственно связаны с недостатками конструкционных решений [452].

Пожалуй, первым известным нам конструктором трибосопряжений был гениальный Леонардо да Винчи, который не только предложил оригинальные конструкционные решения, но и смог связать общее количество узлов трения в машине с эффективностью ее работы [453]. Весомый вклад в развитие современной триботехники внесли: К. С. Ахвердиев, В. А. Белый, О. Б. Богатин, А. Н. Болотов, Б. Д. Воронков, В. А. Воскресенский, Д. Т. Гаевик, М. А. Галахов, Д. Н. Гаркунов, И. Г. Горячева, В. В. Гриб, В. А. Гришко, А. П. Давыдов, Н. Б. Демкин, М. Н. Добычин, Ю. Н. Дроздов, В. Н. Дроздович, Ю. А. Евдокимов, С. М. Захаров, Д. С. Коднир, В. С. Комбалов, Х. Б. Кордонский, М. В. Коровчинский, И. В. Крагельский, Б. И. Купчинов, Н. М. Михин, М. И. Петроковец, Л. С. Пинчук, М. Е. Подольский, А. И. Свиридёнок, П. В. Сысоев, Г. М. Харач, С. А. Чернавский, Д. Мур, Э. Фальц, С. В. Фуут, Х. Чихос и др.

Общие вопросы триботехники, включая материалы для трущихся сопряжений, в том числе используемые в форме покрытий, представлены в работах [21, 68, 85, 102, 105, 139, 164, 174, 189, 211, 356, 359–361, 454]. Вместе с тем, сегодня в триботехнике существуют, уже ставшие классическими, типовые конструкционные решения: использование прямых и обратных пар трения [68, 455, 456], оптимизация размеров сопрягаемых поверхностей [68, 457, 458], обеспечение разгрузки трибосопряжений [68, 191, 459] и свободного термического расширения деталей [68, 460], создание пор в поверхностном слое и объеме материалов [461], реализация оптимального микро- и макрорельефа поверхностей трения [462–465]. Кроме этих методов применяются принципы равномерного износа [191] и взаимного дополнения качества, плавающие детали, а также замена внешнего трения внутренним трением упругого элемента и трения скольжения трением качения [68]. Особо следует выделить группу конструкционных решений, предусматривающих автоматическую компенсацию износа самых разнообразных типов трибосопряжений [191, 466–468]. Ме-

тодам расчета и проектирования трибосопряжений посвящены монографии [72, 85, 113, 174, 454, 469–473].

Подшипники скольжения являются, пожалуй, самыми распространенными трибосопряжениями машин и отличаются рядом несомненных достоинств: плавностью хода, нечувствительностью к вибрациям и большим динамическим нагрузкам, относительно низкой стоимостью изготовления при примерно одинаковом с шарикоподшипниками сроке эксплуатации и др. [68, 174, 189, 298].

Анализ тенденций развития и совершенствования узлов с трением скольжения показывает, что большое внимание в последние десятилетия двадцатого века уделялось совершенствованию гидродинамических и газовых подшипников [175, 426, 454, 474, 475]. Интенсивно, в этот же период времени, разрабатывались новые конструкции самосмазывающихся и слоистых подшипниковых узлов [103, 164, 174, 199, 212, 476–478]. Продолжалось дальнейшее совершенствование трибосопряжений с упругими элементами (демпферами) и пакетных (наборных) узлов трения [189, 360, 457, 479, 480]. Предложены оригинальные и высокоэффективные конструкции активных магнитных трибосопряжений [459, 481, 482]. Заслуживают особого внимания разработки терморегулируемых и самодиагностируемых подшипников скольжения, позволяющие существенно повысить надежность самых разнообразных трибомеханических систем [103, 483].

Подшипники качения, по сведениям выдающегося римского архитектора и инженера Витрувия, успешно применялись в осадных машинах армии Александра Македонского уже в 1 веке до н. э. [453]. Выдающийся вклад в создание как шариковых, так и роликовых подшипников качения внесли Леонардо да Винчи (15–16 век) и Генри Тимкен (1889 г.). Сама конструкция подшипников качения за последние 50 лет изменилась практически мало [484–486]. Основополагающими тенденциями совершенствования узлов трения в настоящее время являются: использование новых типов материалов и методов их поверхностной обработки, оптимальных конструкций направляющих, сепараторов и тел качения.

В конструкциях современных подшипников качения широко используются как традиционные материалы — стали с улучшенным качеством, достигнутым, например, путем высокой очистки от неметаллических включений при воздушном переплаве, так и относительно новые типы материалов — композиционные полимерные и керамические [487, 488].

Улучшенными эксплуатационными характеристиками обладают

подшипники, на рабочие поверхности деталей которых наносят электроизоляционные, приработочные, смазочные и другие виды специальных покрытий [489].

Значительно повысить долговечность тел качения можно путем создания специального микрорельефа на их рабочих поверхностях, оптимизации формы (профиля) и размеров [490, 491]. При изготовлении сепараторов подшипников качения используются композиционные материалы на основе металлов и полимеров [492, 493].

Перспективными направлениями создания высоконадежных подшипников качения являются: конструирование узлов, исключающих трение скольжения [494], содержащих дополнительные источники (резерв) смазочного материала [495] и имеющих оптимальные геометрические параметры поверхностей [496]. Считается, что определенную перспективу также имеют подшипники с разъемными корпусами [497] и состоящие, в основном, из унифицированных узлов и деталей [498].

Сопряжение цилиндр-поршень, первое упоминание о котором в истории техники связывают с именем Александрийского механика Ктесибия (около 3 в. до н. э.), впервые было применено при создании двухцилиндрового пожарного насоса [499]. В настоящее время трибосистемы подобного типа наиболее часто используются в виде золотниковых и плунжерных пар и сопряжений поршень-цилиндровая гильза двигателей внутреннего сгорания.

Для повышения трибологической надежности таких прецизионных узлов трения, какими являются золотниковые и плунжерные пары, предложены современные конструкционные решения [457, 500, 501]. Кроме того, достаточно эффективным является реализация в этих узлах трения эффекта избирательного переноса [502].

Основные конструкционные пути улучшения трибологических характеристик цилиндропоршневой группы двигателей внутреннего сгорания формируются на основе тщательного анализа условий их работы, включая определяющий вид изнашивания деталей [503]. Очень часто, при этом, используются современные методы триботехнологии [504] и трибоматериаловедения [505].

Резьбовые соединения играют особую роль в конструкциях трибосистем самого различного назначения. Наглядным подтверждением этому являются специальные слушания в конгрессе США и принятый в начале 90-х годов двадцатого века закон о качестве крепежных деталей [506].

Конструкционные методы повышения долговечности резьбовых

соединений достаточно широко представлены в работах [21, 85, 507–509].

Сообщается о применении в конструкции резьбовых соединений новых высокоэффективных анаэробных составов и микрокапсулированных клеящих материалов [510, 511], обеспечивающих требуемый уровень надежности изделий.

Зубчатые соединения, начиная от бесконечного винта Архимеда, механизмов Герона Александрийского и других изобретателей античности, являются одними из древнейших машиностроительных элементов, известных человечеству уже более двух тысяч лет.

Триботехника современных зубчатых соединений достаточно полно представлена в монографиях [512–515].

Заслуживают внимания конструкционные решения, обеспечивающие разгрузку соединений при помощи постоянных магнитов, самоустановку пары трения с использованием упругих элементов и улучшение условий смазывания трущихся поверхностей [512, 515–518]. Особо следует отметить попытки использования специальных накладок на рабочую поверхность зубьев, изготовленных из износостойкого керамического материала, и придания им оригинальной формы, предотвращающей взаимное вращение колес в обратном направлении [519, 520].

Электрические контакты стали объектом пристального внимания трибологов, по-видимому, с необходимостью решения задачи передачи тока в электрических двигателях. Одним из первых, приступивших к решению этой задачи, был выдающийся американский изобретатель Э. Томсон [453].

Трибологические аспекты использования электрических контактов, включая их современную классификацию, подробно изложены в работах [85, 175, 211, 521].

Исследованиями установлено, что возникновение искрения или дугообразования в скользящих контактах всегда ведет к дополнительному возрастанию износа [522], а физико-химические процессы в зоне контакта и вторичные структуры на поверхностях трущихся тел существенно влияют на изнашивание сопряжений [175, 523]. В целом, сегодня уже не вызывает сомнений существование корреляции между электрическими и фрикционными характеристиками электрических контактов [211, 524].

Представляются имеющими определенную перспективу выводы работ [525, 526], в которых подчеркивается целесообразность стабилизации положения щеток, обеспечивающая равномерное распреде-

ление токовых нагрузок по контактной поверхности.

Прессовые соединения представляют собой совершенно оригинальный вид трибосопряжений [85, 507, 527, 528]. Специфические особенности соединений – высокие удельные нагрузки, сверхмалые скорости и перемещения – обусловливают значительные методические трудности изучения их триботехнических свойств. Это, в свою очередь, является серьезным препятствием на пути создания более совершенных в триботехническом отношении конструкций узлов трения.

Ряд традиционных конструкционных решений, обеспечивающих улучшение эксплуатационных свойств прессовых соединений, изложен в работах [135, 529, 530]. Следует отметить широкое применение в конструкциях прессовых соединений тонких полимерных покрытий [202, 529], которые, наряду с изменением макрогеометрии вала [531] и использованием твердых граненых зерен [532], обеспечивают достаточно прочное соединение деталей. Предлагается также при соединении вала с втулкой использовать промежуточное кольцо с цилиндрической внутренней и конической наружной поверхностями [533].

Шлицевые соединения представляют собой разновидность зубчатых зацеплений и широко используются для передачи вращательного движения в самых разнообразных механических устройствах и машинах [534].

Предложены оригинальные конструкции шлицевых соединений, позволяющие компенсировать несоосности и погрешности соединяемых валов, устранить боковой зазор между шлицами вала и насаживаемой на него детали, снизить динамические нагрузки в трущемся сопряжении [535, 536]. Достаточно эффективным является использование в шлицевых соединениях эластичных (упругих) покрытий и вкладышей [537] и шариковых элементов [538].

В определенной степени перспективными представляются конструкции, отличающиеся полным отсутствием боковых зазоров в соединении, изготовленные из материалов с резко отличающимися коэффициентами линейного расширения и имеющие в своем составе магнитные элементы [539, 540].

Ременные передачи появились и начали широко использоваться в различных видах человеческой деятельности во второй половине первого тысячелетия до нашей эры [499].

Некоторые общие вопросы конструирования ременных передач рассмотрены в работах [541, 542]. Получили широкое распростране-

ние ременные передачи с зубчатым ремнем, узкими клиновыми и плоскими ремнями [543, 544]. Сообщается о запатентованных конструкциях многослойных клиновых и поликлиновых ремней [545] и малошумного зубчатого ремня [546].

Эффективным средством улучшения служебных свойств ременных передач является использование в их конструкции новых видов композиционных материалов [545, 547].

Кулачковый механизм, как и некоторые другие типы узлов трения, во многом обязан своему появлению и широкому распространению благодаря гению Леонардо да Винчи [548]. В практически неизменном виде механизм сохранял свои элементарные начальные формы на протяжении пяти веков – с XIV по XVIII в., и претерпел некоторые изменения лишь после изобретения двигателя внутреннего сгорания [499].

Конструкции основных типов кулачковых пар представлены в работах [135, 142, 507, 549, 550]. В современных двигателях внутреннего сгорания, наряду с совершенствованием систем смазывания трущихся сопряжений, используются износостойкие керамические материалы [322, 551].

Кинематическая пара винт–гайка была известна уже в I веке н. э. Предполагается, что первый винтовой механизм изобрел великий древнегреческий математик и механик Архимед [499].

Современные конструкции сопряжений винт–гайка представлены в работах [135, 142]. Кроме того, запатентованы устройства, содержащие в своем составе постоянные магниты [552] и элементы, обеспечивающие режим газовой смазки узлов трения [553]. Некоторые оригинальные конструкционные решения предусматривают более совершенную смазку трибосопряжений, возможность компенсации угловых погрешностей [554] и износа деталей подшипниковых узлов [466].

Уплотнения – одни из важнейших элементов практически любой машины, во многом определяющие ее техническое состояние, возможность безопасной эксплуатации в отношении людей и окружающей их среды.

Современные конструкции, их классификация и особенности контактного взаимодействия в герметизирующих системах изложены в фундаментальных монографиях и статьях [175, 200, 299, 300, 556]. В известной степени условно можно выделить два основных направления совершенствования герметизирующих систем: путем применения новых материалов [296, 300, 557] и более совершенных в

техническом отношении конструкций уплотнений [175, 200]. При этом герметизирующие материалы могут использоваться в уплотнительных системах в виде монолитных деталей, покрытий, гранул, нитей, шнура, плетеных тканей и др. [300]. Известны конструкционные решения, предусматривающие изготовление уплотнительных элементов в виде гофрированных колец, дублированных пластин из разнородных материалов (например, сталь–полимер), плетеных шнуров прямоугольного или круглого сечения и др. [300, 558, 559].

Можно предполагать, что в машинах и трибомеханических системах будущего найдут широкое применение комбинированные (гибридные) уплотнительные элементы, материалы с памятью формы и магнитоуправляемые материалы [317, 560–562].

Шарнирные соединения (механизмы) появились в Европе предположительно в XII в. Развитие этих трущихся соединений происходило крайне медленно в связи с несовершенством технологии изготовления. Свой вклад в совершенствование шарнирных соединений внесли английский ученый Роберт Гук, испанский инженер Хуанело Турриано, русский математик Пафнутий Львович Чебышев и др. [499].

Современные конструкции шарнирных соединений описаны в работах [65, 85, 454, 563]. Для повышения трибологической надежности шарниров предложены конструкции узлов с плавающими втулками [564] и системой масляных канавок на рабочей поверхности подшипника [565]. Уменьшить габариты и массу шарнирных узлов можно также путем использования в их конструкции трибополимеробразующего твердосмазочного покрытия [203].

Валы и оси имеют чрезвычайно древнее происхождение. По-видимому, они произошли от рычажных механизмов и своим бурным развитием и основным применением обязаны изобретению двигателя внутреннего сгорания [499].

Современные коленчатые валы являются незаменимой частью очень многих машин и механизмов [529, 566]. Заявлены конструкции валов, в которых не только сами валы, но и кулачки являются полыми [567, 568]. В некоторых конструкциях полости заполняют твердеющим формуемым материалом [569]. Для повышения долговечности рабочим поверхностям валов придают специальную форму, выполняют на них микроканалы или подвергают фосфато-магниевому (цинковому) упрочнению [570, 571].

Несомненное будущее имеют валы, изготовленные из композиционных полимерных материалов на основе реактопластов феноль-

ного типа [572] и углепластиков [573].

Система колесодорожное покрытие. Весьма затруднительно обозначить хотя бы ориентировочно дату изобретения колеса; можно лишь утверждать, что это происходило в глубокой древности. Знания, накопленные о колесе в течение тысячелетий, удачно были обобщены известным итальянским деятелем эпохи Возрождения Д. Альберти (XV век) [499]. Теория и практика трибологии, включая современные конструкции колес, представлены в работах [85, 102, 297, 507, 574, 575].

В завершение обозначим наиболее перспективные тенденции развития триботехники.

Весьма вероятно, что на этапе расчета параметров трибоконструкций будут широко использоваться основные уравнения квантовой механики, методы квантовой статистики и динамики жидкости [576].

Очевидно, в ближайшие годы получит дальнейшее развитие системный анализ [577]. При этом будет использоваться более углубленный избирательный подход к формулировке требований функционального поведения узлов трения в эксплуатации, а синтез трибосистем будет осуществляться с помощью методов поискового конструирования и ЭВМ [578, 579]. Благодаря этому трибосопряжения XXI века будут иметь оптимальные геометрические, физико-механические и трибологические характеристики, содержать встроенные устройства диагностики и отличаться повышенной надежностью в эксплуатации [580–582]. Кроме того, трибосистемы так называемой «третьей волны машин» [583] будут отличаться большой гибкостью в переналадке на выполнение различных функций только путем подачи на их вход соответствующих электрических сигналов управления, задающих требуемые законы изменения их выходных триботехнических параметров.

При совершенствовании существующих и разработке принципиально новых конструкций узлов трения будут использоваться решения, подсказанные самой природой, в частности, структура и материалы суставов человека и животных [453, 584].

Триботехнология охватывает две крупные области приложений трибологии, связанные с изучением процессов формообразования деталей, обработки материалов разрушающими и деформирующими, преимущественно механическими, методами во взаимосвязи с триботехническими характеристиками; с разработкой технологических методов получения требуемых триботехнических характеристик

поверхностей трения [28, 585–593].

Весьма значительный вклад в развитие основ современной триботехнологии внесли: Б. Н. Арзамасов, А. В. Белый, В. А. Белый, А. Г. Бойцов, И. Н. Бородин, Н. Л. Голего, О. А. Горленко, А. Г. Григорьянц, В. А. Довгяло, Н. Н. Дорожкин, В. Н. Кестельман, К. С. Колесников, Н. Д. Кузнецов, Б. И. Купчинов, Н. В. Молодык, Н. К. Мышкин, А. С. Неверов, Н. В. Олейник, Ю. М. Плескачевский, С. Н. Полевой, А. В. Рогачев, Д. А. Родченко, Э. В. Рыжов, А. И. Свиридёнок, А. М. Сулима, А. Г. Суслов, П. В. Сысоев, Ю. Г. Шнейдер, О. Р. Юркевич, Э. Вадас, Я. Янецкий и др.

Весьма значительным достижением в трибологии явилось введение и обоснование П. И. Ящерицыным и Ю. В. Скорыниным понятий «технологическая и эксплуатационная наследственность» и установление их связи с долговечностью машин [588, 591, 593–595]. Это позволяет не только предложить вполне конкретные рекомендации по выбору наиболее выгодных сочетаний финишных операций и рациональных конструкций узлов трения, но и с учетом этих факторов повысить объективность информации, получаемой в процессе трибологических испытаний (диагностики) трущихся сопряжений.

Отдельные попытки классификации триботехнических технологий рассмотрены в работах [72, 585, 586]. Нам представляется, что с определенной степенью условности все технологические методы улучшения служебных свойств трибосопряжений могут быть разделены на группы, отличающиеся степенью материально-энергетических затрат на их осуществление.

Пластинирование деталей машин – широко используемый в ремонтной практике метод восстановления изношенных поверхностей деталей машин. Свое обобщение и развитие пластинирование получило в монографии [596], в которой метод определяется как совокупность правил, определяющих последовательность и содержание действий при выполнении формообразования, обработки, сборки, перемещения, включая технический контроль, испытаний (в процессе изготовления или восстановления деталей пластинированием), установленных безотносительно к их наименованию, типоразмеру или исполнению.

Сущность технологического метода пластинирования деталей состоит в том, что внутренняя или наружная цилиндрическая (коническая) или плоская поверхность детали облицовывается напряженно, свободно или связанно тонкими пластинами, изготовленными

из стальной холоднокатаной термообработанной ленты, или пластинами из другого упругого прочного материала определенной геометрической формы и размеров.

Перспективы дальнейшего развития метода его авторы видят в использовании заготовок (лент), выполненных из специальных износостойких материалов, управлении рельефом поверхности лент и улучшении их триботехнических характеристик путем напыления износостойких покрытий, разработке специального автоматизированного оборудования и др.

Заливка жидким металлом – один из наиболее известных и давно используемых методов восстановления работоспособного состояния изношенных деталей машин. Первые упоминания об его эффективном использовании для заливки вкладышей шатунов отечественных автомобилей АМО-Ф-15 относятся к 1933 году [597].

При заливке многокомпонентных сплавов, например, баббитов, весьма велика вероятность возникновения ликвации, т. е. неравномерного распределения компонентов по толщине заливаемого слоя. Устраняют ликвацию, как правило, путем подбора технологических режимов заливки.

Весьма актуальной является также проблема назначения оптимальной толщины заливаемого слоя, определяющей многие физико-механические и триботехнические характеристики узлов трения [72, 360, 549, 598, 599].

Метод заливки жидким металлом продолжает использоваться и совершенствоваться и в наше время [598, 600].

Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) как технологический метод улучшения триботехнических характеристик деталей трения своим появлением обязан открытию, сделанному выдающимися российскими трибологами Д. Н. Гаркуновым и И. В. Крагельским [68].

Технологический процесс ФАБО, например, деталей цилиндропоршневой группы представляет собой фрикционное нанесение покрытия на трущиеся поверхности, предварительно обработанные специальной технологической жидкостью. В результате механического и физико-химического взаимодействий поверхности обрабатываемой детали, технологической жидкости и материала обрабатывающего инструмента деталь покрывается антифрикционным слоем медного сплава [63, 66, 68, 69, 85, 601, 602]. К технологическим достоинствам метода относятся: очень малый расход материала и энер-

гии при заметном уменьшении трения, изнашивания и, в особенности, склонности к заеданию; нейтральность к окружающей среде; малая продолжительность процесса и возможность его автоматизации; обеспечение устойчивого качества покрытия даже при определенных отклонениях от оптимальных параметров технологического процесса [601].

Электрохимические технологии отличаются своим многообразием и широкими возможностями регулирования триботехнических характеристик поверхностных слоев материалов при изготовлении и ремонте трибосопряжений [603, 604]. Свое начало технологии получили благодаря работам гениального ученого XVIII–XIX вв. М. Фарадея.

В практической деятельности очень многих машиностроительных и ремонтных предприятий в настоящее время используются: хромирование, железнение, никелирование, меднение и цинкование [65, 72, 85, 603, 605]. Все более широко также применяются электрохимические полимерные покрытия [606]. В 90-х годах двадцатого века применяемые электрохимические покрытия имеют, как правило, многокомпонентные конструкцию и состав и, как следствие, улучшенные триботехнические характеристики [604, 607]. При этом в качестве основы покрытий используются хром, никель, железо, медь и т. д., а в качестве компонентов (модификаторов) — мелкодисперсные порошки корунда, полиамида, политетрафторэтилена, дисульфида молибдена и других материалов.

Дальнейшее развитие и совершенствование трибоэлектрохимических технологий, весьма вероятно, будет осуществляться с широким использованием керамических материалов, высокопроизводительных и эффективных технологических процессов, методов управления структурой формируемых покрытий [608, 609].

Механическая обработка – традиционная, часто завершающая операция технологического процесса ремонта большинства самых разнообразных деталей машин и механизмов. В последние годы механическим методам обработки уделяется особое внимание в связи с широким использованием для восстановления деталей машин материалов и покрытий, твердость которых приближается к твердости обрабатывающего инструмента.

Многочисленные исследования позволили установить существенное влияние вида механической обработки и используемых смазочно-охлаждающих сред на физико-механические и фрикционно-износные характеристики поверхностных слоев материалов [30, 72, 75, 590,

610–612].

Очевидно, что при совершенствовании существующих и разработке новых методов механической обработки, весьма полезным окажется использование методики системного анализа, высокоэффективных СОЖ и новых технологических решений финишной обработки рабочих поверхностей деталей трения [613, 614].

Применение полимерных материалов – эффективная и универсальная триботехнология, приобретшая свою реальную практическую значимость после создания полимеров и разработки на их основе композиций триботехнического назначения [103, 164, 189, 202, 256, 257, 296, 512].

Наиболее часто полимерные материалы в триботехнике используются в виде тонкослойных покрытий и монолитных (корпусных) деталей трения [285, 615, 616]. К наиболее перспективным и динамически развивающимся триботехнологиям следует отнести группу вакуумных методов, позволяющих осуществлять формирование полимерных покрытий практически любого заданного состава и конструкции. Немаловажно, что при этом имеется возможность получать надежные в триботехническом отношении тонкие и сверхтонкие (доли микрометра) покрытия [306, 617].

Для получения качественных полимерных изделий с заданными свойствами необходимо учитывать особенности физико-химических взаимодействий на границе раздела фаз, условия (температурно-временные режимы, среду и т. д.) формирования и состав используемых композиционных материалов [84, 164, 285, 618, 619].

Эпиламирование – одна из самых уникальных технологий двадцатого века, получившая свое начало от известных и ставших уже классическими исследований мономолекулярных слоев И. Лэнгмюра и К. Б. Блоджет [99, 414, 620, 621]. Свое последующее развитие эта технология получила благодаря трудам А. С. Ахматова, Б. В. Дерягина, П. А. Ребиндера, Н. К. Адама, В. и Дж. Гарди, Х. Дево и др.

Определились два основных направления применения эпиламов: в качестве присадки к смазочным материалам и в виде тонких покрытий деталей трения [62, 585, 622]. Исследования позволили установить, что оба указанных направления позволяют существенно снизить материальные и энергетические потери в трущихся сопряжениях. В отдельных случаях эффект от эпиламирования был кратковременным или не обеспечивал условий для нормальной приработки трущихся сопряжений в условиях реальной эксплуатации [622].

В работах [623, 624] показано, что триботехнические свойства пленок фторсодержащих олигомеров (эпиламов) определяются их толщиной, а ориентационное влияние силового поля подложки и энергетические факторы (мягкое рентгеновское излучение и термообработка) способствуют образованию в покрытии упорядоченных образований, т. е. покрытие, по существу, представляет собой конгломерат аморфных (бесструктурных) и упорядоченных (кристаллических) образований.

Не установлено непосредственного влияния эпилама на структурное состояние контактирующих с ним поверхностных слоев металла. Вместе с тем, отмечается, что эпиламирование приводит к снижению поверхностной энергии металлических материалов (в ряде случаев до нескольких мДж/м^2) [625].

Считают, что улучшение триботехнических характеристик эпиламированных поверхностей обусловлено меньшим искажением кристаллической структуры материалов при трении, а в условиях граничного смазывания поверхностей – заметно более качественным удержанием смазочного материала в зоне контакта трущихся тел [626, 627]. Не исключается также, что это может быть связано с увеличением толщины адгезионно взаимодействующего с эпиламированной подложкой слоя смазочного материала [628] или изменением механизма изнашивания поверхностей, например, от адгезионного к усталостному в результате их обработки эпиламом [629].

Химико-термическая обработка (ХТО) – одна из наиболее хорошо исследованных и разработанных технологий, в целом ряде случаев достаточно эффективная и широко используемая в практической деятельности многих машиностроительных и ремонтных предприятий.

Технология и классификация методов химико-термической обработки представлены в монографиях [591, 630–632].

В плане дальнейшего улучшения химико-термических методов обработки металлических материалов (азотирования, хромирования, борирования, алитирования, силицирования, сульфидирования и др.), по-видимому, большое значение будут иметь технологии, позволяющие получать многокомпонентные диффузионные покрытия [633]. Достаточно перспективным представляется использование в методах ХТО лазерных технологий (как на стадиях нанесения покрытий, так и их последующей термической обработки) [634], специальной калибровки покрытий [635] и формирования практически бездефектных поверхностных слоев материалов [636].

Лазерные технологии – несомненное технологическое достижение двадцатого века, позволившее обеспечить новый качественный уровень триботехнических характеристик поверхностных слоев материалов [637, 638].

Универсальность лазерных технологий позволяет использовать их для наплавки, легирования, прошивки отверстий, ударного упрочнения, выглаживания и термообработки материалов [638, 639]. Кроме того, технологии, практически без каких-либо ограничений, могут быть использованы для снижения потерь на трение и повышения износостойкости самых разнообразных конструкционных материалов [592, 637, 638].

Можно предполагать, что в ближайшие годы будут все более широко использоваться комбинированные методы ударно-волновой и лазерной обработки материалов [640]. Все большее распространение лазерные технологии будут получать для создания специального микрорельефа и поверхностного градиента свойств сопрягаемых деталей [641, 642], а также поверхностной обработки керамики, титана и его сплавов, полимерных композитов и некоторых других перспективных триботехнических материалов [592, 643].

Электроэрозионная обработка материалов. Принято считать, что этот метод обработки поверхностей материалов был разработан советскими учеными Б. Р. и Н. И. Лазаренко в начале сороковых годов двадцатого века. Интенсивное развитие технологии электроэрозионной обработки в последующие годы осуществлялось также и некоторыми другими учеными. Это привело к созданию целой гаммы способов практического использования технологии: повышения износостойкости поверхностей деталей машин, работающих в условиях повышенных температур и инертных газовых сред; создания шероховатости под последующее гальваническое покрытие; увеличения размеров изношенных деталей машин при ремонте; изменения свойств поверхностей изделий из цветных металлов и др. [585, 586, 591, 644–646].

Поиск новых областей применения этой технологии продолжается и в 90-е годы двадцатого века [647, 648]. При этом наиболее эффективным является сочетание электроэрозионной обработки с другими технологическими методами, например, такими, как поверхностное пластическое деформирование, термическая обработка, химико-термическая обработка и др. [590].

Наплавка – один из наиболее распространенных методов восстановления работоспособности изношенных деталей машин [72, 586].

Широкое использование наплавки во многом обусловлено ее относительной простотой и довольно широкими технологическими возможностями [649, 650].

Научные основы наплавки были созданы выдающимися учеными – Н. Н. Бенардосом, В. В. Петровым и Н. Г. Славяновым [649]. Дальнейшее развитие технологии наплавки привело к созданию технологий дуговой газопорошковой, многоэлектродной и плазменной наплавок [649, 651, 652]. Значительный практический интерес представляет также индукционно-металлургический способ восстановления трущихся деталей [653].

В последнее время отмечается повышенное внимание к исследованиям по оптимизации состава наплавочных материалов, в частности, использования в качестве легирующих элементов хрома, марганца, вольфрама, молибдена и других материалов [654].

Ионно-лучевая обработка – уникальная технология, разработанная во второй половине двадцатого века для получения требуемых эксплуатационных характеристик поверхностных слоев материалов, в том числе триботехнического назначения.

Ионно-лучевая обработка материалов, включая используемые оборудование и технологические режимы, достаточно подробно представлена в ряде фундаментальных монографий отечественных и зарубежных ученых [655–657]. Кроме того, этому виду обработки посвящены многочисленные статьи и обзоры [658–659].

Установлено, что для металлополимерных пар трения глубина модифицированного слоя с измененными механическими свойствами в несколько раз превышает глубину проникновения имплантируемых ионов, а с увеличением их энергии скорость изнашивания образцов снижается [660]. При осуществлении ионной имплантации необходимо учитывать влияние исходного состава, свойств поверхности, сорта ионов и характера структурных превращений на направление и величину изменения фрикционных свойств материалов [661].

Трибологическими испытаниями и методами электронной микроскопии установлено, что имплантация ионов бора способствует снижению адгезионных свойств поверхностей трения [662]. Показано, что имплантация (бор, углерод, азот, титан, углерод) может приводить к образованию на поверхности обрабатываемых сталей тонких аморфных слоев материалов, позитивно влияющих на триботехнические характеристики узлов трения [663].

Можно предположить, что в триботехнике найдут широкое применение многослойные ионно-плазменные покрытия [664]. Перспек-

тивно также использование ионной имплантации для улучшения характеристик деталей трибосопряжений, изготовленных из керамических материалов [665].

Плазменные технологии могут использоваться как для упрочнения деталей машин при их изготовлении, так и для восстановления их работоспособности на стадии ремонта.

Технологические особенности применения плазменных методов изложены в работах [666–670].

Весьма вероятно, что в ближайшие годы будут широко использоваться многослойные плазменные покрытия и технология вакуумного плазменного нитрирования коленчатых валов дизельных двигателей [670]. По-видимому, только дальнейшие исследования смогут подтвердить перспективность применения плазменных аморфных покрытий в металлополимерных узлах трения [671].

Методы пластического деформирования (алмазное выглаживание, обкатывание и раскатывание, калибрование, вибронакатывание и др.) довольно широко используются в целом ряде отраслей народного хозяйства страны для обеспечения трибологической надежности сопряжений [588, 657, 672–675].

При определении целесообразности применения методов пластического деформирования авторы работы [676] предлагают учитывать механизм изнашивания трибосопряжений.

Значительный прогресс в разработке новых эффективных методов пластического деформирования (ППД) достигнут в последние десятилетия.

По-видимому, определенную перспективу имеет предложенный белорусскими учеными метод импульсно-силового вибронакатывания, который, как показали испытания, может быть с высокой эффективностью применен для увеличения моторесурса тракторных и автомобильных двигателей внутреннего сгорания [677].

Можно также утверждать, что при дальнейшей разработке технологий поверхностного пластического деформирования будут использоваться сочетания различных триботехнологических методов улучшения характеристик узлов трения, например, ППД с химико-термической обработкой, объемным деформационным упрочнением, электрохимическими технологиями и др. Введение в зону деформирования внешних полей электромагнитной природы позволит значительно повысить эффективность технологии поверхностного пластического деформирования материалов [678].

Термическая обработка – классический метод улучшения

свойств материалов [72, 168, 585, 592, 679–682].

Одна из первых работ, посвященных использованию термообработки для улучшения свойств конструкционных металлических материалов, в том числе и триботехнического назначения, была опубликована М. М. Хрущевым в 1937 году [683].

О существенном влиянии температурно-временных режимов термообработки и используемых при этом закалочных сред на антифрикционные свойства металлических и полимерных материалов сообщается в публикациях ряда отечественных и зарубежных исследователей [681, 682, 684, 685].

Новым направлением термической обработки материалов стала предложенная А. П. Гуляевым в 1937 году обработка холодом [168, 585].

Значительного положительного эффекта улучшения триботехнических характеристик удается достичь при осуществлении комбинированной обработки холодом и лазерной закалки металлических материалов [686]. Заслуживают внимания термическая обработка деталей в магнитном поле и при виброперемешивании охлаждающей среды [175, 687].

Магнитные (электромагнитные) технологии предусматривают использование электромагнитных полей для уменьшения остаточных и усталостных напряжений в деталях и конструкциях, повышения износостойкости деталей трибосистем. Это становится возможным благодаря направленной ориентации свободных электронов вещества внешним полем, вследствие чего увеличивается тепло- и электропроводимость материала [585, 687, 688].

Развитие этой триботехнологии идет по пути создания комплексных магнитно-электрических методов обработки [689].

Проведенные исследования позволяют считать, что повышение износостойкости намагниченных деталей обусловлено взаимодействием возбужденных молекул водорода, появляющихся в зоне контакта трущихся поверхностей в присутствии магнитного поля [690].

Анализ современного состояния и тенденций совершенствования триботехнологий позволяет с большой степенью вероятности прогнозировать пути их перспективного развития.

Можно предполагать, что в ближайшие годы для упрочнения и восстановления изношенных деталей машин будут широко использоваться наплавочные покрытия, полученные методом самораспространяющегося синтеза [247, 691], и покрытия из материалов на основе карбида титана, сформированные путем химического осажде-

ния из газовой фазы в вакууме [692]. Отсутствуют сомнения о будущем высокоэффективных электрических методов управления триботехническими свойствами композиционных полимерных материалов [42, 693].

В целом, можно констатировать, что будущее будет принадлежать преимущественно комбинированным технологическим методам, обеспечивающим получение трибосопряжений с заданным уровнем трибологической надежности. Для реализации указанной концепции уже предлагаются методики выбора оптимального сочетания технологических методов обработки деталей узлов трения [694] и автоматизированные системы создания прогрессивных триботехнологий [695]. Несмотря на некоторое отставание в разработке теоретических основ развития комбинированных триботехнологий, они все более широко используются на практике [590, 696].

Трибоинформатика была создана практически в последние десятилетия двадцатого века и довольно быстро стала одной из важнейших частей современной трибологии. Это во многом объясняется значительно увеличившимися объемами научных исследований и расширением международного обмена научной информацией между учеными и специалистами-триботогами разных стран.

По-видимому, первыми официальными информационными источниками трибологических знаний, дошедшими до нашего времени, являются записные книжки Леонардо да Винчи – так называемый «Атлантический кодекс», а также обнаруженный в 1967 году в одной из библиотек Испании его «Мадридский кодекс» [98, 577].

Современный этап развития трибоинформатики, в основном, сохраняет черты и подходы общей информатики, т. е. работы ведутся по направлениям, изучающим закономерности создания трибологической информации, ее преобразования, хранения и передачи для использования в науке, образовании и производстве [3, 7, 12]. Основы научной информации, организация научно-информационной деятельности, вопросы развития и применения информационных технологий в разных областях жизнедеятельности человека представлены в монографиях [697–699].

Вопросам создания новых информационных технологий в трибологии посвящены работы: Г. Д. Гамули, Е. Н. Докучаевой, А. Л. Жарина, С. М. Захарова, В. М. Кенько, Ю. Е. Кирпиченко, О. В. Холодилова, С. Ивата, Г. Кохлхааса, Д. Р. Лиде, Дж. Р. Фриза, А. О. Шейфера и др.

Процесс создания трибологической информации в 90-е годы двад-

цатого века в научном мире стал довольно заметным явлением. Так, по мнению П. Джоста, ежегодно публикуется более 10000 статей по трибологии [2]. Одним из перспективных направлений становится разработка распределенных трибологических сетей, основными элементами которых являются автоматизированные триботестеры [700].

Актуальными направлениями в трибоинформатике являются также исследования в области создания компьютерных баз данных по свойствам триботехнических материалов и методам их поверхностной модификации, конструкциям подшипниковых узлов, библиографическим трибологическим данным [701–705].

К сожалению, значительная часть трибологических данных, содержащаяся в базах, часто не может быть эффективно использована ввиду несопоставимости используемого оборудования и режимов испытаний, отсутствия сведений о параметрах среды, некоторых характеристиках испытываемых материалов и т. п. В этой связи важной представляется проблема стандартизации методов трибологических исследований и организации баз данных. Использование баз данных позволяет уже сегодня решать достаточно сложные задачи, например, по созданию систем автоматизированного проектирования подшипниковых узлов или комплексной автоматизации работ по обеспечению износостойкости деталей машин и механизмов на стадиях конструирования и технологического проектирования [2, 706, 707].

Появление экспертных систем характеризовало собой начало нового этапа развития трибоинформатики. Отличительной особенностью экспертных систем является их структура, органично включающая в себя оболочку, базы данных и знаний [708, 709].

В трибологии экспертные системы разрабатываются для решения технологических задач, оценки работоспособности и оптимального выбора конструкций узлов трения, диагностики повреждений трибоузлов [710–712].

В ряде случаев при создании экспертных систем исследователи сталкиваются с ограничениями технико-экономического характера, возникающими, например, при сравнении затрат на создание системы и экономического эффекта от ее использования для решения конкретной технической задачи.

Проблемы трибологического образования в последние годы были предметом ряда статей и дискуссий на международных симпозиумах и конгрессах [713–716]. По своему содержанию и значимости нам хотелось бы выделить предложенные В. Барцом курсы по триболо-

гии для технического колледжа и технической академии в Эсслингене [716].

В целом, можно констатировать, что в трибологическом образовании за последние годы наметились ощутимые перемены к лучшему. Об этом, в частности, свидетельствует выпуск целого ряда учебников и учебных пособий для высших учебных заведений [68, 717–721, 806].

Весьма полезными для системы трибологического образования окажутся библиографические обзоры литературных источников, предложенные в [722, 723] и сведения об отечественных источниках информации по трибологии за период с 1990 по 1997 годы [7].

В завершение отметим наиболее важные и перспективные тенденции в развитии современной трибоинформатики.

Чрезвычайно актуальным следует признать обобщение накопленного опыта и представлений о возможностях компьютерной трибологии как инструмента решения трибологических задач в тех областях, где применение компьютеров приводит к новым результатам, где новое знание нельзя получить другими средствами, где происходит сращивание новой информационной технологии, рожденной компьютерами, с задачами трибологии, например, триботехники [724]. По-видимому, новому переосмыслению должны быть подвергнуты и возможности использования вычислительной техники в трибологических лабораториях, являющихся важнейшим начальным звеном получения новой информации [725].

Можно предположить, что в ближайшие годы большое внимание будет уделяться вопросам стандартизации и сертификации в областях создания, хранения, передачи и использования трибологической информации.

Возможно, что более широко будут использоваться интеллектуальные системы оценки и прогнозирования ресурса машин, основанные на интегрированных расчетно-экспериментальных моделях трения и износа, описывающих физические, механические и химические взаимодействия в трибосистемах на макро-, мезо- и микроуровнях [726].

Весьма вероятно, что на новом этапе развития информационных технологий в трибологии найдут применение и так называемые CALS-технологии (Continuous Acquisition and Life-cycle Support), предусматривающие использование технологий создания, поддержки и применения единого информационного пространства на всех этапах жизненного цикла продукции – от ее проектирования до эк-

сплуатации и утилизации [727].

Представляется весьма уместным привести в заключение выдержку из работы Н. П. Су и С. Яханмира [10], в которой рассматриваются в том числе и информационные проблемы трибологии. «*Организация потока информации к потребителю является чрезвычайно важной частью будущего технического прогресса. В настоящее время информация поступает беспорядочно и несистематизированно через технические конференции, семинары, лекции и обзоры. Однако, большая часть этих мероприятий не предназначена для практиков и не всегда понятна для них. Поэтому обязанностью государственных лабораторий и технических обществ является активное распространение знаний, передача эффективных практических решений в промышленность, стандартизация зарекомендовавших себя технологий и методов. Специальные программы обучения для инженеров в промышленности и для преподавателей в высшей школе могут многое улучшить в ускорении переноса знаний от исследовательских лабораторий к потребителю. В век информационного взрыва и компьютеризации существует огромный потенциал в использовании информатики для организации и распространения трибологических знаний*».

Трибомониторинг – наиболее динамично развивающийся раздел современной трибологии, охватывающий всю совокупность средств и методов испытаний, диагностики, непрерывного контроля и регулирования характеристик подвижных сопряжений. В круг проблем, связанных с этим понятием, входит все большее число задач из всех областей развития трибоанализа, трибоматериаловедения, триботехники и триботехнологии, поскольку в каждом из этих разделов интенсивно развиваются современные методы исследований, выделяются унифицированные методики испытаний материалов и сопряжений в целом, совершенствуются способы оценки и регулирования заданных эксплуатационных параметров. В свою очередь, данные, полученные с помощью трибомониторинга, служат основой развития трибоинформатики [12, 20].

Трибомониторинг включает в себя два взаимосвязанных направления: трибометрию и трибодиагностику.

Трибометрия охватывает методы и средства измерения основных параметров фрикционного контакта (сила трения, износ, температура, шероховатость, контурная и фактическая площади касания, контактная деформация) и является непреложным атрибутом практически всех видов экспериментальных модельных и натурных исследований подшипниковых узлов.

Становление трибометрии как науки во многом связано с исследованиями, выполненными при непосредственном участии и под руководством В. А. Балакина, В. А. Белого, В. В. Гриба, Н. Б. Демкина, Ф. Я. Загавура, В. В. Запорожца, В. С. Комбалова, И. В. Крагельского, Н. К. Мышкина, М. И. Петроковца, Э. В. Рыжова, Я. А. Рудзита, В. Г. Савкина, А. И. Свиридёнка, С. А. Чижика, А. Бенгтссона, Ф. П. Боудена, Б. Дж. Гриффитса, Х. Йенеманна, Д. Мура, В. Пекошевского, Д. Тэйбора, Х. Чихоса, М. Шчерека и др.

Современные методы измерений фрикционных и износных характеристик трибосопряжений подробно описаны в [14, 17, 18, 113].

Оценка температурного режима узлов трения является одной из главных проблем трибологической контрольно-измерительной техники. Для измерения температуры фрикционного контакта тел могут быть использованы аналитические, приближенные косвенные и непосредственные методы [14]. Х. Чихос, рассматривая технику измерения температуры при трибологических исследованиях, отмечает, что при этом чаще всего используются встроенные и динамические термоэлементы, температурные зонды и инфракрасные микроскопы [728]. В своей большей части проводимые исследования предусматривают измерение температур в приповерхностном слое и непосредственно на рабочих поверхностях элементов пар трения [122, 719, 729, 730]. Достаточно актуальной также является разработка метрологических основ измерений нестационарных температурных полей при трении [731].

Измерение параметров шероховатости поверхностей трения и анализ полученных при этом данных позволяют получать значительный объем информации о характеристиках фрикционного контакта твердых тел [23, 26, 27]. С учетом установленной Н. Б. Демкиным степени влияния различных параметров шероховатости поверхностей на фрикционно-износные характеристики контакта, это, в свою очередь, позволяет обеспечить заданный уровень качества при изготовлении, прогнозировать и управлять состоянием трибосистем в процессе их эксплуатации [17, 24, 113]. Заслуживают внимания исследования, посвященные автоматизации измерительного процесса и разработке методических вопросов расчетно-экспериментального определения микротопографических параметров поверхностей трения [732, 733]. Новая информация о свойствах тонких поверхностных слоев материалов может быть получена путем регистрации топографического изображения поверхности с помощью профилогра-

фа и при использовании сканирующей туннельной микроскопии [26, 734].

Учение о площадях контакта твердых тел является базой для развития целого ряда других разделов современной трибологии [23, 113]. Методы и средства оценки площадей контакта представлены в [72, 113]. Значительный интерес представляют работы, в которых исследуются вопросы формирования единичных контактов, их взаимодействия и деформации в процессе перемещения поверхностей трения [24, 507].

Для современной трибометрии характерно стремление к определению параметров непосредственно в процессе фрикционного взаимодействия, к повышению точности, применению дублирующих систем и одновременной оценки максимально возможного количества параметров, к автоматизации экспериментов и обработки их результатов [20]. Совершенствование и развитие ряда других направлений трибометрии продолжается и в последние десятилетия двадцатого века [113, 577].

Трибодиагностика, как уже отмечалось ранее, является относительно молодым и интенсивно развивающимся направлением трибомониторинга и трибологии в целом. Как самостоятельная дисциплина, трибодиагностика заявила о себе практически только в последние годы. Вместе с тем, методы и средства диагностики трибосопряжений уже достаточно давно и традиционно являются составной частью технической диагностики машин и механизмов [735, 736].

Все более повышающиеся требования к качеству материалов, деталей машин и узлов трения определяют одну из основных особенностей современного этапа развития трибодиагностики — необходимость создания новых методов и средств, предназначенных для непрерывного контроля характеристик трибосистем на всех стадиях их жизненного цикла.

Другой особенностью трибодиагностики является все более широкое использование системного подхода к решению самых разнообразных диагностических задач [577, 728, 736, 737].

Подытоживая вышеизложенное, можно с большой долей уверенности утверждать, что методы контроля изнашивания материалов, основанные на оценке температурного режима их работы, например [738], будут разрабатываться с учетом специфики эксплуатации трибосистем и все более широко использоваться на практике. Во многом это объясняется тем, что трение по своей природе является диссипативным процессом, обусловливающим выделение тепла непос-

редственно в процессе работы подшипниковых узлов. Дальнейшее повышение точности измерений износа трибосопряжений при этом будет связано с возможно более полным устранением негативного влияния на измеряемые величины износа факторов, зависящих непосредственно от температурного режима работы контролируемых систем (деформация, тепловое расширение и др.).

По-видимому, определенную перспективу имеет использование для анализа свойств изношенных поверхностей представлений теории фракталов [739], а также испытания с использованием лазерных лучей (шерография), позволяющие определять на поверхностях деталей трения дефекты размером от 0,3 мкм [740].

Представляется весьма интересным создание систем контроля трибосопряжений машин, основанных на использовании ультразвуковых волн, проходящих через диагностируемые узлы трения [741].

Высокую технологическую и экономическую эффективность имеют компьютеризированные системы дистанционной диагностики изнашивания подшипниковых узлов. Наличие специализированного банка данных по различным типам трибосистем и их возможным дефектам делает такие диагностические системы еще более гибкими и, вместе с тем, обеспечивает возможность прогнозирования их поведения в процессе эксплуатации [742].

Разработке методологических основ триботелатометрии должен способствовать анализ используемых диагностических параметров, усталостных повреждений деталей трения, методов и средств контроля потерь энергии и изнашивания трущихся сопряжений.

1.2. Диагностика узлов трения

Общие принципы, основные задачи и общеметодологические вопросы экспериментальной диагностики представлены в работах [13, 18, 20, 736, 743].

Отдельным вопросам диагностики трущихся сопряжений посвящены работы: В. М. Власова, М. Д. Генкина, В. Е. Канарчука, В. В. Клюева, В. И. Колесникова, Л. В. Марковой, Н. К. Мышкина, В. В. Невзорова, А. С. Проникова, Л. Ю. Пружанского, К. М. Рогульскиса, А. И. Свиридёнка, А. И. Соколова, Н. Т. Тищенко, О. В. Холодилова, В. В. Шаповалова, А. Р. Лансдауна, В. Лешека, Ф. Томашевского, Ч. Цемпелы и др.

Параметры диагностирования являются одним из важнейших элементов трибодиагностической процедуры, так как от их правильного выбора зависят не только точность измеряемых величин и дос-

товерность получаемых результатов, но и сам смысл проводимой работы.

В монографии [736] представлены классификация диагностических сигналов и их свойства. Достаточно подробно рассмотрены детерминированные и случайные сигналы, методы обработки получаемой диагностической информации.

Измеряемые диагностические параметры выбирают из множества принципиально возможных параметров для исследования информативности признаков, сформированных на этих параметрах. На основании информативности признаков определяют окончательный состав измеряемых физических параметров, которые используются в дальнейшем для диагноза неисправных состояний. Основу логической процедуры диагноза составляет совокупность физических величин, с помощью которых при измерении определяются структурные параметры диагностирования объектов.

Физические параметры разделяют на следующие группы: кинематические, геометрические, статические, динамические, тепловые, акустические, электрические и магнитные, механические и молекулярные, излучений, атомной физики, универсальные физические постоянные [735]. Состав вышеуказанных групп приведен в таблице 1.1.

Анализ приведенных в таблице 1.1 параметров диагностирования показывает, что в настоящее время лишь небольшая их часть в той или иной форме и степени применяется для диагностики трущихся сопряжений машин. Это, в первую очередь, говорит о существовании больших резервов, использование которых может не только значительно повысить эффективность уже известных методов и средств диагностирования, но и предложить принципиально новые, основанные на неиспользованных ранее физических явлениях и процессах.

Измерение физических параметров положено в основу практически всех методов и средств технического диагностирования, имеющих свои конструкционно-технологические отличия и особенности. Для диагностики трущихся сопряжений используются параметры большинства групп, приведенных в таблице 1.1. Вместе с тем, необходимо отметить, что все-таки большая часть этих параметров относится к группам, находящимся в верхней части упомянутой таблицы.

Можно утверждать, что по мере дальнейшего развития науки и техники все большее применение будут получать параметры групп из нижней части таблицы 1.1, например, универсальные физические постоянные, атомной физики и излучений.

Приведем примеры практического использования некоторых физических параметров для диагностирования трущихся сопряжений машин и механизмов:

Группа кинематических параметров

Время, равно как и частота, достаточно широко используются в качестве диагностического параметра в различных технических средствах диагностирования, в том числе и в процессе трибологических испытаний материалов. Как физическая величина, время проявляется в моментах и интервалах, количественными оценками которых являются, соответственно, дата момента времени и длительность интервала времени. В качестве диагностических параметров используются как однократные моменты времени – моменты времени единичных, неповторяющихся событий, так и многократные моменты времени – моменты потока событий.

Табл. 1.1. Параметры диагностирования (физические)

Группа параметров	Параметры
Кинематические	Время, скорость, ускорение, угловая скорость, угловое ускорение, период, частота периодического процесса, фаза, объемный расход, плотность объемного расхода, градиент скорости
Геометрические	Длина, высота, ширина, площадь, объем, плоский угол, телесный угол, кривизна линии, кривизна поверхности, момент сопротивления плоской фигуры, осевой и полярный моменты инерции площади плоской фигуры
Статические и динамические	Масса, сила, импульс силы, количество движения, давление, градиент давления, работа, энергия, объемная плотность, мощность, коэффициент трения, коэффициент сопротивления, коэффициент упругости, момент силы, момент инерции, массовый расход, массовая скорость потока, затухание, добротность
Механические и молекулярные	Плотность, удельный объем, количество вещества, относительная молекулярная масса, молярная масса, молярный объем, коэффициент продольного растяжения, модуль продольной упругости, коэффициент всестороннего сжатия, твердость, ударная вязкость, динамическая вязкость, текучесть, кинематическая вязкость, коэффициент поверхностного натяжения, концентрация, коэффициент диффузии, функция распределения
Тепловые	Температура, количество теплоты, температурный градиент, тепловой поток, поверхностная плотность теплового потока, энтропия, теплоемкость (объемная и удельная), теплота фазового превращения, теплота сгорания топлива, коэффициент теплопроводности, коэффициент теплопередачи, коэффициент температуропроводности, температурные коэффициенты

Продолжение табл. 1.1

Группа параметров	Параметры
Акустические	Звуковое давление, объемная скорость, звуковая энергия, плотность звуковой энергии, интенсивность звука, акустическое сопротивление, удельное акустическое сопротивление, механическое сопротивление, интенсивность звука, высота звука, тембр звука, громкость звука, акустический коэффициент отражения, акустический коэффициент поглощения, акустическая проницаемость перегородки, время реверберации
Электрические и магнитные	Электрический заряд, поверхностная плотность заряда, напряженность электрического поля, электрическое смещение, поток электрического смещения, потенциал, электрический момент диполя, емкость, поляризованность, диэлектрическая проницаемость, диэлектрическая восприимчивость, сила тока, плотность тока, электрическое сопротивление, электрическая проводимость, удельное электрическое сопротивление, удельная проводимость, магнитная индукция, магнитный поток, напряженность магнитного поля, магнитный момент, магнитодвижущая сила, магнитное сопротивление, индуктивность, взаимная индуктивность, намагниченность, магнитная проницаемость
Излучений	Лучистый поток (поток излучения), поверхностная плотность мощности излучения, энергетическая освещенность, лучистая экспозиция, сила света, энергетическая яркость, энергия излучения, спектральная плотность энергии излучения по длине волны, спектральная плотность лучистой энергии (по частоте), световая энергия, освещенность, яркость, световая экспозиция, относительная световая эффективность, сила света, коэффициент преломления, коэффициент отражения, коэффициент поглощения, коэффициент пропускания
Атомной физики	Момент количества движения, момент диполя, поляризуемость, доза поглощенного излучения, экспозиционная доза излучения, радиоактивность, коэффициент рекомбинации
Универсальные физические постоянные	Скорость света в вакууме, гравитационная постоянная, масса (покоя) электрона, масса (покоя) протона, масса (покоя) нейтрона, число Фарадея, постоянная Планка, постоянная тонкой структуры, комптоновская длина волны, постоянная Ридберга, боровский радиус, магнетон Бора, магнитный момент электрона, универсальная газовая постоянная

Однократные и многократные моменты времени характеризуются различным набором количественных оценок, подлежащих измерению. Первые – одной датой этого момента на принятой шкале времени, вторые – набором дат этих моментов, датой одного из моментов и набором длительностей интервалов между ними и т. д.

Многократные моменты по характеру их повторения разделяют на периодически повторяющиеся моменты, которые следуют через строго равные интервалы времени, и апериодически повторяющиеся моменты, которые следуют через неравные интервалы времени. Последовательность случайно повторяющихся моментов нельзя определить каким-либо конечным набором параметров: в этом случае используется набор тех или иных статистических оценок, дающих определенное представление об объекте измерения (статистическое описание).

На первых этапах развития диагностирования наиболее часто использовались простейшие временные диагностические параметры – единичные моменты и интервалы времени. Однако по мере усложнения объектов и программ диагностирования и соответствующего развития диагностических систем наиболее распространенными стали сложные временные диагностические параметры – потоки моментов и интервалов времени. Вид используемых временных диагностических параметров определяет требования к используемым методам и средствам их измерения [735]. В практике трибологических испытаний временные или, как их еще иногда называют, ресурсные испытания подшипниковых узлов являются одними из наиболее распространенных.

Кроме времени из этой группы параметров для представления данных трибологических испытаний используются также скорость и ускорение измеряемого процесса.

Группа геометрических параметров

Геометрические размеры деталей узлов трения являются одним из наиболее часто используемых трибодиагностических параметров, например, при определении величины линейного износа, интенсивности изнашивания и ряда других характеристик трибосистем [17, 24, 113, 719]. К сожалению, число реально применяемых на практике параметров этой группы в основном ограничивается длиной и шириной поверхностей, участвующих в трении, а также высотой изношенного слоя трибодеталей. Находят применение также и некоторые производные геометрические параметры, например, площадь поверхностей трения и объем поверхностного слоя (деталей).

В ряде случаев измерение геометрических параметров позволяет кроме размеров оценить также расположение тех или иных пространственных элементов, являющихся (зачастую искусственно) частями контролируемых деталей трибосопряжений.

Иногда достижение предельного размера элементов трибосистем контролируют при помощи встроенных, имеющих определен-

ную геометрическую форму и физические свойства, например, цвет, элементов (вставок) [744].

Группа статических и динамических параметров

Можно с полной уверенностью утверждать, что эта группа по степени своей применимости в трибодиагностике не имеет равных, так как большая часть входящих в нее параметров в настоящее время уже широко используется для контроля технического состояния самых разнообразных трибосистем [14, 17, 24, 38, 113]. К числу наиболее часто используемых трибодиагностических параметров относятся: масса и коэффициент (сила) трения. Ряд параметров (работа, энергия, мощность и др.) являются расчетными и требуют для своего определения привлечения данных о параметрах, относящихся к другим группам.

Группа механических и молекулярных параметров

Параметры, входящие в эту группу, используются в трибодиагностике крайне ограниченно. Известны попытки применения в качестве дополнительных (используемых при расчетах) параметров плотности, удельного объема, твердости, кинематической вязкости [14, 17, 24, 113].

Группа тепловых параметров

Представляет собой одну из наиболее перспективных групп трибодиагностических параметров. Во многом это объясняется феноменом самого трения, сопровождающегося выделением тепла.

Наиболее часто для диагностики узлов трения используются температура, количество теплоты, температурный градиент, различные виды температурных коэффициентов [16, 134, 719, 735, 736]. Все больше получают распространение комбинированные методы диагностирования, предусматривающие использование нескольких тепловых параметров, например, максимальной температуры, максимального перепада температур, фоновой температуры, скорости изменения максимальной температуры [745].

Группа акустических параметров

Параметры, входящие в эту группу, и, собственно, сам акустический метод и его разновидности, начали все более широко использоваться в последние два–три десятилетия XX-го века [20, 746].

В качестве параметров, характеризующих техническое состояние трибосистем, используют число, амплитуду и длительность импульсов; скорость счета; мощность акустической эмиссии; интенсивность, высоту, тембр и громкость звука и др.

Для повышения точности определения износа механических час-

тей подшипниковых узлов используют сочетание акустических (мощности) и некоторых других параметров [747].

Группа электрических и магнитных параметров

Параметры этой группы, в настоящее время являющейся одной из наиболее перспективных с точки зрения проведения экспресс-диагностики смазочных сред, начинают получать все более широкое применение при контроле технического состояния самых разнообразных узлов трения [735, 748].

В качестве параметров диагностирования применяют потенциал, емкость, силу тока, электрическое сопротивление, напряженность магнитного поля и др.

Весьма интересными представляются выводы работы [124], в которой делается попытка использовать в качестве диагностического параметра магнитную компоненту электромагнитного излучения трущегося сопряжения.

Относительно новым и перспективным направлением в трибодиагностике является использование неоднородных магнитных полей и, соответственно, их характеристик в качестве параметров, характеризующих состояние трибосистем [749].

Группа параметров излучений

Наиболее известное в настоящее время применение параметров этой группы – при бесконтактной тепловой диагностике машин [750].

Установлено, что между отдельными параметрами излучения, например, оптической плотностью смазочного материала и износом трибосопряжений существует вполне однозначная связь [751].

В последние годы наметилась тенденция к использованию оптических параметров излучений в сочетании с магнитными параметрами. Это позволяет значительно повысить эффективность контроля процесса изнашивания материалов [752, 753].

Группа параметров атомной физики

Исследования связи межатомного взаимодействия, атомных свойств и износостойкости материалов практически находятся в своей начальной стадии [161, 181].

Эта группа параметров крайне ограниченно применяется для диагностики трущихся сопряжений машин и механизмов. Исключение составляет, пожалуй, метод поверхностной активации, в котором в качестве параметров диагностирования используются: энергия частиц, доза поглощенного излучения, относительная скорость счета и др. [754].

Группа параметров универсальных физических постоянных

В настоящее время в трибодиагностике параметры этой группы практически не используются.

В завершение рассмотрения трибодиагностических параметров отметим наиболее важные с нашей точки зрения тенденции их развития и практического применения. Во-первых, расширение числа параметров, используемых для диагностики трибосистем, будет происходить по мере дальнейшего углубления наших представлений о природе трения и изнашивания твердых тел и, в первую очередь, за счет более «наукоемких групп», т. е. групп, расположенных преимущественно в середине и нижней части таблицы 1.1. Во-вторых, ведущей тенденцией в трибодиагностике является использование для оценки технического состояния систем параметров из разных групп, например, излучений, тепловых или магнитных. С учетом современных тенденций развития трибодиагностики можно ожидать, что уже в ближайшее время исследователи предложат оригинальные диагностические процедуры, предусматривающие раздельное или совместное использование тепловых и акустических параметров, а также электрических и магнитных параметров и параметров из группы излучений. Вместе с тем, в ближайшие годы будут широко использоваться и некоторые «традиционные» диагностические параметры, например, время, масса, линейный размер (длина, высота, ширина) и др.

Потери энергии в процессе испытаний или эксплуатации трибосистем являются одной из наиболее важных характеристик работы практически любой машины или технического устройства.

Наиболее часто энергетические потери в трущихся сопряжениях оценивают по значениям коэффициента (силы) или момента трения [14, 16, 17, 24, 113, 719]. Для прямого определения этих величин разработан и широко используется на практике ряд эффективных методов и устройств. Опишем некоторые их них.

Оценка силы трения может осуществляться следующими способами [735]:

1. Измерением ускорения тела с известной массой
   - посредством акселерометра;
   - измерением амплитуды и частоты колебаний.
2. Сравнением неизвестной силы с силой тяжести непосредственным нагружением образцовыми гирями
   - посредством гидропередачи и образцовых гирь;

- посредством рычагов и образцовых гирь;
- посредством рычагов и маятника.

3. Измерением упругой деформации тела, взаимодействующего с неизвестной силой

- посредством датчиков деформации;
- посредством датчиков перемещения.

4. Сравнением неизвестной силы с силой взаимодействия тока с магнитным полем посредством электродинамического силовозбудителя.

Измерение переменной гармонической силы путем определения амплитуды и частоты колебаний тела с известной массой может быть осуществлено с высокой точностью. Массу можно измерить с погрешностью, не превышающей несколько тысячных долей процента. С такой же точностью можно измерить и частоту колебаний. Амплитуду колебаний тела с известной массой можно измерить с погрешностью, не превышающей нескольких десятых долей процента, которая, по существу, и будет определять погрешность измерения силы указанным методом.

Метод измерения силы сравнением неизвестной силы с силой тяжести используют при точных измерениях и воспроизведении статических и квазистатических сил.

Метод непосредственного нагружения преимущественно используют для создания государственных первичных эталонов единицы силы, воспроизводящих ее с наивысшей точностью.

Метод сравнения неизвестной силы с силой тяжести посредством рычагов и образцовых гирь используют для создания образцовых средств второго разряда для измерения силы, обеспечивающих ее измерение с погрешностью, не превышающей 0,2 % измеряемой величины, а также в силоизмерителях испытательных машин, обеспечивающих измерение силы трения в диапазоне от 0,04 до 1 от верхнего предела силоизмерителя.

Метод сравнения неизвестной силы с силой тяжести посредством гидропередачи и образцовых гирь используют также в образцовых средствах второго разряда для измерения силы и в силоизмерителях испытательных машин – триботестеров. Для исключения трения в гидропередаче применяют пару поршень–цилиндр, в которой один из элементов вращается относительно другого.

Метод сравнения неизвестной силы с силой тяжести посредством рычагов и маятника используют в силоизмерителях испытательных

машин. Использование маятниковых силоизмерителей в трибодиагностике продолжает оставаться актуальным уже в течение нескольких десятилетий [590, 755].

Все средства для измерения силы, основанные на методах сравнения неизвестной силы с силой тяжести, обычно представляют собой стационарные установки. Процесс сравнения сил в этих установках механизирован.

Измерение силы посредством измерения упругой деформации тела, взаимодействующего с неизвестной силой, является самым распространенным методом, который используют как в стационарных, так и в переносных средствах для измерения статических и переменных во времени сил, в том числе и в устройствах для оценки фрикционных свойств материалов [14]. Метод позволяет создать средства измерения растягивающих и сжимающих сил – динамометры, которые содержат упругий элемент, снабженные для его включения в силовую цепь захватами либо опорами. Упругий элемент может быть электрически неактивным либо электрически активным, т. е. он является одновременно и чувствительным элементом. Для достижения оптимальных метрологических характеристик динамометра необходимо соблюдение нескольких принципов [735].

Принцип цельности конструкции предполагает, что измеряемая сила должна передаваться в динамометре по сплошной среде из одного материала. Нарушение сплошности конструкции упругого элемента является причиной возникновения трения между сопрягаемыми элементами. С этим трением связаны погрешности измерения силы, которые могут быть значительными.

Принцип интегрирования свидетельствует о том, что точность динамометра зависит от распределения чувствительного элемента по поперечному сечению упругого элемента. С этой целью используют усреднение – интегрирование напряжения или деформации упругого элемента.

Одним из наиболее распространенных чувствительных элементов, применяемых в динамометрах, является тензорезисторный датчик деформации. Работа тензорезисторов основана на явлении тензоэффекта, заключающегося в изменении активного сопротивления проводников или полупроводников при их механической деформации. Методы определения силы и момента трения при помощи динамометров, получившие наибольшее распространение в практике трибологических испытаний, представлены в работах [14, 743].

Методология оценки потерь энергии в трущихся сопряжениях

машин продолжает оставаться одним из актуальных направлений современной трибодиагностики. Так, например, предложен способ определения момента трения в подшипниках качения и скольжения, предусматривающий использование в качестве параметра диагностирования угла поворота кольца подшипника, при котором достигается равновесие между моментом трения $M_т$ и моментом, образованным силой $Psin\alpha$, приложенной на радиусе r [756]. Момент трения, в частности, подшипников качения может быть рассчитан на основе экспериментально определенных значений теплоемкости подшипника, начальной, конечной и средней температурам трения, частоте вращения и времени испытаний [757]. Для регистрации с высокой точностью очень малых значений силы трения при испытании тонких поверхностных слоев и покрытий разработаны оригинальные методика испытаний и конструкция микротрибометра [758].

Изнашивание трущихся сопряжений является постоянным и, по-видимому, главным предметом пристального внимания ученых и практиков, специализирующихся в самых различных областях диагностики трибосистем [20, 191, 297, 584, 748, 753, 754].

Методологическим проблемам испытаний материалов на изнашивание в разные годы уделялось и продолжает уделяться большое внимание со стороны крупнейших как отечественных, так и зарубежных трибологов [20, 50, 105, 716, 743, 760–762].

Следует отметить, что одной из первых статей, посвященных разработке методологических основ износных испытаний материалов, была работа М. М. Хрущова, опубликованная в 1937 году [763].

Диалектика создания и развития методов и технических средств для исследования процессов трения и изнашивания твердых тел представлены в ставшей уже классической монографии по истории трибологии И. В. Крагельского и В. С. Щедрова [98].

Первая отечественная машина (машина «А») для испытания на изнашивание была создана А. К. Зайцевым в 1920 году [764]. В последующем развитию приборной базы трибологии во многом способствовали работы: Э. Д. Брауна, В. Н. Кащеева, Б. И. Костецкого, И. В. Крагельского, В. Д. Кузнецова, Б. Л. Смушковича, М. М. Хрущова, А. В. Чичинадзе, Ф. П. Боудена, А. Камерона, М. А. Плинта, Д. Тейбора, М. Шчерека и др.

Единой общепринятой классификации машин трения до настоящего времени не создано, хотя время от времени такие попытки предпринимаются, и в ряде случаев приводят к получению интерес-

ных результатов [24, 113, 765].

Современные конструкции машин трения и методов испытаний, получившие наибольшее распространение в практике ведущих трибологических центров Англии, Беларуси, Польши, России, Украины и ряда других стран представлены в работах [85, 103, 257, 761, 766–768]. Некоторые из серийных машин трения впоследствии были существенно усовершенствованы и модернизированы [768–770].

Большое число самых разнообразных задач теоретического и практического характера, поставленных перед трибологией в последние десятилетия двадцатого века, привели к необходимости создания чрезвычайно большого, фактически не поддающегося учету, числа специализированных машин трения. Такие установки, как правило, предназначены для исследований и решения какой-либо одной сугубо прикладной задачи, например, испытаний при высоких скоростях скольжения, малых и имеющих циклический и/или ударный характер изменения нагрузок, вакуума, высоких и низких температурах и др. [16, 38, 72, 103, 393, 771–774].

Стремление максимально приблизить условия испытаний к условиям реальной эксплуатации обусловило создание соответствующих исследовательских методов и средств, предназначенных для конкретных типов узлов трения, например таких как плунжерные пары, передача винт–гайка, цилиндропоршневой группы д. в. с., шнековых механизмов, шлицевых соединений, уплотнений и др. [370, 501, 513, 759, 775–777].

Ряд конструкций триботестеров разрабатывался для более углубленных исследований процессов и явлений, имеющих место при том или ином преобладающем виде изнашивания испытуемых трибосистем, например, абразивном, окислительном, усталостном, фреттинг-коррозии и др. [30, 38, 113, 530, 778].

Ведущей тенденцией в создании триботестеров является разработка на их базе автоматизированных измерительных комплексов, содержащих в своем составе персональную ЭВМ, на которую в этом случае возлагаются функции управления процессом испытаний, обработки и хранения получаемой информации [779–781].

В условиях существующей известной неопределенности в методических вопросах выбора оптимальной стратегии и тактики проведения исследований [782, 783], особую актуальность приобретает разработка микротрибометров, позволяющих оценивать фрикционные параметры тонких поверхностных слоев материалов [758, 784].

Большое научное значение и высокая практическая значимость

результатов, получаемых в процессе испытаний материалов на трение и изнашивание, привели к появлению нескольких обобщающих работ системного характера. Отметим в этом направлении работу польского триболога профессора М. Шчерека [761].

Анализ современного состояния диагностики изнашивания трибосистем позволяет выделить методы, получившие наибольшее распространение на практике: акустико-эмиссионные, виброакустические, искусственных баз, поверхностной активации, микрометрирования, оптические, по потере массы изнашиваемыми деталями, профилографирования, спектральные, термодиагностирования, ультразвуковые, феррографии, фрактографии и электрические.

Акустико-эмиссионные методы

Представляют собой достаточно хорошо разработанную методически группу методов, основанных на непрерывной регистрации акустических колебаний трех видов: автоколебаний, возникающих в результате изменения статистических, динамических или кинематических условий испытаний сопряжений; эмиссионных колебаний (акустической эмиссии) – волн напряжений, вызванных пластическим деформированием, структурно-фазовой перестройкой и разрушением поверхности трения; поверхностных волн, сопровождающих процессы трения и изнашивания твердых тел [20].

В качестве параметров акустической эмиссии используют энергию излучаемых импульсов, скорость изменения интенсивности акустической эмиссии и скорость изменения ее дисперсии, произведение элементарного изношенного объема материала и частоты следования несимметричных импульсных сигналов акустического излучения и др. [20, 785].

Широкие возможности акустической эмиссии позволяют использовать ее для оценки прирабатываемости сопряжений, диагностики состояния редукторов в реальных условиях эксплуатации, контроля служебных свойств смазочных сред, определения скорости объемного изнашивания при абразивном разрушении материалов, контроля структурной неоднородности деталей узлов трения качения и др. [786–788].

Существование связи между параметрами акустической эмиссии и характеристиками самых разнообразных трибосистем доказано многочисленными достоверными экспериментальными данными [20, 789].

Виброакустические методы

Эта группа методов отличается своей эффективностью, хорошо

разработанной теоретической базой и достаточно широко используется для диагностики технического состояния оборудования, механизмов и различного назначения машин [735, 736, 746]. Суть методов заключается в измерении параметров реакций трибомеханических систем в результате воздействия на них колебаний (ударных импульсов), излучаемых устройством, являющимся по отношению к диагностируемому объекту внешним или внутренним (встроенным).

Вибрационное диагностирование объектов проводится в три этапа: первичное описание вибрационного состояния объекта, выделение признаков и принятие решения. При этом в качестве параметров диагностирования наиболее часто применяют следующие характеристики вибрационных процессов: перемещения, скорость, ускорение, размах колебаний, дисперсию, спектральную плотность мощности, уровень акустической мощности и др., а также некоторые комбинированные показатели [735]. На виброграммах выделяют три характерных области, каждая из которых является источником информации о тех или иных дефектах трибосистемы [790].

Наибольшее распространение методы виброакустической диагностики получили при мониторинге различного типа подшипников качения и скольжения [745]. Известны результаты исследований, в которых метод был применен для оценки величины износа гильзы цилиндров дизельного двигателя. Достигнутая при этом точность измерений составила 0,75 мкм [791].

В последние годы ряд ведущих мировых фирм, специализирующихся в области диагностического приборостроения, выпустили стационарные и переносные виброприборы, позволяющие осуществлять не только диагноз трибосопряжений, но и на основе полученных данных при помощи встроенного компьютера предупреждать возникновение аварийных состояний и определять их остаточный ресурс (долговечность по износу). Предпринимаются попытки на основе методов вибрационной диагностики предложить диагностируемые конструкции подшипниковых узлов с элементами управления их техническим состоянием в процессе эксплуатации [792].

Метод искусственных баз

Развитие и становление этого метода диагностирования стало возможным, в основном, благодаря трудам российских ученых М. М. Хрущова и Е. С. Берковича [24, 113]. Основной идеей метода является создание на поверхности трения искусственных углублений очень малой величины: выдавленные отпечатки, сделанные пирамидой или конусом; высверленные конические углубления; лунки,

вырезанные резаком, вышлифованные или вытертые. Дно этих углублений служит как бы неизменной искусственной базой, от которой измеряется расстояние до поверхности трения; изменение этого расстояния равно износу в данном месте поверхности. Из многочисленных вариантов наиболее точным и удобным является метод вырезанных лунок [175].

Благодаря ряду неоспоримых преимуществ, метод может быть применен для оценки износа шеек коленчатых валов, поршневых колец и гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания, зубчатых передач, плоских направляющих скольжения и др. [566, 793]. Используется метод также и в практике лабораторных испытаний материалов на трение и изнашивание.

Необходимо отметить, что развитие метода искусственных баз в последние два–три десятилетия заметно замедлилось, хотя можно отметить некоторые оригинальные конструкционные решения и методические разработки, предложенные в этот период времени [794].

Метод поверхностной активации

Метод предложен В. Я. Моисеевым, В. И. Постниковым и Д. Г. Точильниковым в 1965 году и предназначен для контроля износа деталей машин и механизмов в процессе их стендовых испытаний и эксплуатации [795]. Метод позволяет осуществлять непрерывный или периодический контроль износа основных деталей машин без их остановки и разборки.

Суть метода состоит в облучении изнашиваемой поверхности потоком ускоренных заряженных частиц, например, Co^{56} [754]. При этом в поверхностном слое детали глубиной примерно 50 мкм образуются участки радиоактивного материала, изнашивающиеся совместно с остальным материалом детали в процессе ее работы. Величину износа детали определяют путем измерения интенсивности излучаемого ей γ-излучения или по радиоактивному излучению частиц изнашивания, попавших в смазочное масло или фильтр машины или агрегата.

В настоящее время метод поверхностной активации применяют для оценки износа гильз цилиндров, поршневых колец и клапанов, подшипников скольжения, шестерен, подшипников качения и др. [754, 796, 797].

Метод микрометрирования

Определение размеров изношенных деталей машин и механизмов при помощи микрометрических инструментов является одним из «классических» диагностических методов в трибологии, исполь-

зуемым для периодического контроля износа сопряжений [14, 17, 24].

Микрометрические инструменты выполняют в виде точной микрометрической пары винт–гайка с шагом 0,5 или 1 мкм. Известны встраиваемые микрометрические головки, микрометры, микрометрические глубиномеры, нутромеры и толщиномеры, микрометры для измерения резьбы и др. Наиболее распространенными приборами с зубчатой передачей являются индикаторы часового типа, имеющие цену деления шкалы от 0,01 до 0,001 мм. На практике применяются индикаторные скобы, глубиномеры, нутромеры, различные комбинированные устройства [735]. Часто микрометрические измерительные инструменты являются составной частью достаточно сложных диагностических приборов и систем [798].

Метод микрометрирования на сегодняшний день является самым распространенным методом оценки степени изнашивания зубчатых колес, шлицевых соединений, подшипников скольжения и качения, валов и осей, гильз цилиндров и др., используемым на большинстве машиностроительных и ремонтных предприятий страны [566, 735]. Несколько меньше метод применяют при натурных и стендовых испытаниях машин и агрегатов.

Метод оценки износа по следу изнашивания

Схема испытания диск–плоскость, позволяющая использовать данный метод оценки величины износа исследуемых образцов, была предложена в начале XX-го века и впоследствии реализована в ряде серийных машин трения, например, фирмы «Боинг» и «Фалекс». Несколько позже этот метод получил свое развитие и в трудах отечественных ученых, в частности, М. М. Хрущова [105].

Для оценки величины износа используются геометрические размеры (ширина, глубина, объем) следа изнашивания, образующегося на одной из поверхностей, преимущественно плоской, испытываемых деталей. Метод применяется для периодического контроля износа деталей узлов трения.

Предложены модификации данного метода, предусматривающие возможность проведения испытаний по схеме диск–диск (контакт по образующим), один из которых жестко закреплен и является неподвижным, и торец полого цилиндра–плоскость [105, 761].

В настоящее время намечается все более широкое и активное использование метода в трибологических исследованиях [799]. Во многом этому способствует разработка стандартизированных методик испытаний, например, ASTM G77 [800].

Оптические методы оценки износа

Данная группа методов используется для качественной и количественной оценки степени повреждаемости поверхностей деталей, работающих в условиях трения. Применение их при диагностике, например, подшипников качения позволяет выявить наличие, размеры и вид усталостных разрушений на дорожках и телах качения. Иногда методы этой группы выступают в качестве дополнительных, например, при необходимости оценить размеры износного повреждения деталей в методе измерения износа по следу изнашивания.

Новый импульс в своем развитии эта группа методов получила после изобретения квантовых генераторов и создания на их основе уникальных образцов измерительной техники. Один из видов таких приборов – эллипсометры – уже нашел свое применение в экспериментальной трибодиагностике [52].

Несомненно перспективными представляются приборы для непрерывной диагностики износа трибосопряжений, предусматривающие создание и передачу информации по волоконно-оптическим коммуникационным линиям связи [801].

Оценка износа по потере массы испытываемыми образцами (деталями)

Один из наиболее широко используемых на практике периодических методов контроля величины износа трибосопряжений [14].

Все основные методы измерения массы тел вследствие их изнашивания подразделяются на механические (гравитационное сравнение масс – взвешивание, измерение силы гравитации) и электромеханические (инерционный, магнитоэлектрические и др.). Наиболее распространенным методом измерения массы тел сегодня является гравитационный, основанный на уравновешивании силы гравитационного притяжения тела к Земле некоторой другой силой и измерении последней [735].

Для снижения общей погрешности износных испытаний необходимо соблюдение ряда методических рекомендаций: осуществление тщательной очистки образцов и деталей перед взвешиванием; их охлаждение до температуры среды, в которой производятся измерения; использование соответствующих типов измерительных устройств (весов) и др. В некоторых случаях износ оценивают по массе продуктов изнашивания трибосистем [14, 18].

Профилографирование

Этот метод заключается в снятии профилограмм с контролируемого участка поверхности детали, соответственно, до и после ее из-

носных испытаний. На профилограммах контуры одних и тех же впадин остаются постоянными, а выступы, вследствие износа, изменяют свою высоту. Абсолютная величина уменьшения выступов от линии впадин будет соответствовать величине износа диагностируемой поверхности. В случае, если она превышает высоту неровностей, в качестве постоянной базы, от которой производится измерение, выбирается нерабочий участок исследуемой поверхности [14].

Профилографирование позволяет осуществлять измерения с высокой точностью. Например, абсолютная погрешность определения изменений толщины изнашиваемых твердосмазочных покрытий составляла ±0,5 мкм [802]. Прецизионный характер измерений обусловливает и выбор соответствующих объектов исследований, например, таких, как плунжерные пары топливных насосов дизельных двигателей [803].

Развитие и совершенствование метода профилографирования продолжается и в последние годы [804].

Спектральные методы

Эта группа включает в себя атомно-эмиссионный, атомно-абсорбционный и атомно-флуоресцентный методы анализа. Основой для постановки диагноза является спектр, характеризующий химический состав продуктов износа, находящихся в анализируемой пробе масла, взятого, например, из диагностируемого двигателя внутреннего сгорания. Каждому элементу соответствует своя совокупность спектральных линий, интенсивность которых зависит от количественного содержания элементов в исследуемой пробе [735, 736]. Спектральные методы позволяют осуществлять периодический контроль изнашивания без разборки трущихся сопряжений как в условиях лабораторных испытаний, так и в процессе эксплуатации строительных, транспортных и других машин [805, 806].

Предложен ряд оригинальных решений, направленных на усовершенствование известных методов спектрального анализа. Так, например, предлагается использовать для диагностики трибосистем методы прямого фотометрирования и фотометрирования в ближней инфракрасной области спектра в диапазоне длин волн от 0,8 до 1,0 мкм [807]. Весьма интересным является также применение вращательного депозитора при анализе продуктов изнашивания [808].

Для повышения надежности и упрощения обслуживания машин предложено в их системы смазки включать устройства, обеспечивающие отбор части смазочного материала для его последующего исследования методами спектрального анализа масла [809].

Термодиагностирование

Оценка фрикционно-износных характеристик трибосистем на основе данных о их тепловом состоянии является одним из перспективнейших методов современной трибодиагностики. Наиболее часто в качестве теплового параметра используют температуру [16, 719, 735, 736, 750, 810].

Методы измерения температуры принято делить на две большие группы: контактные и бесконтактные, которые, в свою очередь, подразделяются по физическим эффектам, положенным в основу принципа их действия. В таблице 1.2 приведены основные методы и средства измерения температуры и их усредненные характеристики для соответствующих типов датчиков [735].

Развитие методов термодиагностирования привело к созданию конструкций, содержащих встроенные датчики и устройства для измерения температуры узлов трения [811].

Измеряемые температуры используются также в качестве одного из параметров комплексных методов оценки технического состояния как отдельных узлов трения, так и устройств, содержащих несколько трущихся сопряжений [17, 745].

Экспериментально установлено, что оценка надежности подшипников коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания может производиться путем определения температурного режима их работы [812].

На основе корреляции между моментом трения и температурой подшипникового узла разработан метод определения моментов трения при трибологических испытаниях, а также для температурной диагностики фрикционных характеристик узлов трения машин и механизмов [813].

Ультразвуковая трибодиагностика

Использование энергии ультразвуковых колебаний для диагностики изнашивания сопряжений машин находится в своей начальной стадии.

В работе [791] рассматривается метод измерения износа, основанный на оценке параметров отраженной ультразвуковой волны, и позволяющий определять толщину материалов с точностью 0,015 мкм. Однако практически из-за температурных искажений деталей достигнутая точность измерений составила 0,75 мкм.

Анализ ультразвуковых сигналов, проходящих через слой смазочного материала, позволяет определить степень его загрязнения и пригодность использования для смазывания узлов трения [814].

Табл. 1.2. Методы и средства термометрии и их характеристики

Средства измерения	Постоянная времени, с	Пороговая чувствительность, К	Пространственная разрешающая способность, мм	Температурный диапазон, К
Контактный метод				
Термометры расширения:				
жидкостные стеклянные,	20–100	0,01	5–10	173–873
манометрические,	50–200	0,01	20–100	173–973
дилатометрические,	100–300	0,1	10–100	223–473
биметаллические	100–300	0,1	10–100	223–873
Электротермометры:				
термоэлектрические,	20–200	0,01	1–5	13–2273
терморезистивные,	50–300	0,001	10–100	3–1873
термошумовые,	10–100	0,01	10–100	3–3273
термомагнитные,	10–100	0,01	20–50	23–543
термочастотные,	10–100	0,0001	20	233–473
термоемкостные,	20–200	0,01	20–100	233–573
термотранзисторные	50–100	0,1	20–50	203–473
Волоконно-оптические термометры	0,1–10	0,1	0,5–1,0	263–423
Термоиндикаторы:				
термохромные,	5–10	0,5	1–5	293–423
жидкокристаллические,	5–10	0,2	0,5–2,0	291–393
плавящиеся,	10–50	1	5–10	293–573
люминофорные,	10–100	0,5	1–5	293–473
изооптические	10–50	0,5	1–10	253–423
Бесконтактный метод				
Пирометры излучения:				
яркостные,	10^{-3}–10^{-6}	1–10	0,5–5,0	373–3273
цветовые,	10^{-3}–10^{-5}	1–5	0,2–1,0	473–3773
радиационные	10^{-3}	0,1–1	0,1–0,5	173–2273
Тепловизоры:				
оптико-механические,	$1–5\cdot10^{-2}$	0,01	0,1–1,0	253–1773
пировидиконные	$5\cdot10^{-2}$	0,1	0,1–1,0	293–1073
Лазерные пирометры	10^{-3}–10^{-6}	1–10	1–20	673–3273
Спектрофотометрические пирометры	10^{-3}–10^{-5}	1–5	5–20	873–6273
Акустические пирометры	10^{-3}	1–10	100–500	323–873

Теоретические и практические вопросы ультразвуковой диагностики узлов трения представлены в единственной, известной нам, монографии [815].

Феррография

Анализ частиц износа, содержащихся в смазочных материалах, является эффективным методом контроля состояния трущихся поверхностей, позволяющим активно влиять на повышение надежности машин [203, 736, 748].

Предложены классификации методов и устройств для регистрации частиц износа, а также классификации частиц, образующихся при изнашивании трибосистем [816, 817]. Все методы, служащие для оценки характеристик продуктов износа в смазочных средах, разделяют на три категории: 1) контроль во время работы трибосистем (ТС); 2) сбор продуктов износа в процессе обслуживания ТС; 3) отбор проб смазочного материала и исследование состава продуктов износа вне ТС. Выбор того или иного метода анализа связан с характером механизма изнашивания ТС, определяющего количественные и качественные характеристики частиц износа [818]. При этом следует учитывать вероятность существования корреляции между видом продуктов изнашивания и относительной твердостью материала поверхностного слоя [819].

Методики оценки частиц износа и используемые при этом технические средства непрерывно совершенствуются [820, 821].

В настоящее время феррография используется для непрерывной диагностики деталей трения мощных двигателей внутреннего сгорания, узлов и агрегатов авиационной техники, ряда других ответственных трибосопряжений [822].

Электрофизические методы

Диагностические методы, предусматривающие использование тех или иных электрофизических параметров (тока, напряжения, электрического сопротивления и др.), являются, по-видимому, одними из самых распространенных в триботехнике. Наибольшее применение они получили при непрерывной оценке степени изнашивания трущихся сопряжений и испытании различных видов смазочных материалов и покрытий [20, 37]. Так, например, в работе [823] метод измерения электрического сопротивления контакта использован для оценки триботехнических характеристик композиционных металлических покрытий. Известны также работы, в которых методы этой группы применены для оценки деформации микровыступов и разрушения поверхностных пленок при предварительном смещении, контроля качества подшипников качения, комплексной диагностики приработки пар трения, оценки температурной стойкости материалов и смазок и др. [824–826].

Устройства, основанные на электрофизических методах диагностики, используются для оценки изнашивания и работоспособности таких трибосистем, как подшипники скольжения и качения, тормозные элементы и некоторые другие узлы трения [827–829].

На основе обобщений, вытекающих из вышеприведенных ме-

тодов оценки изнашивания сопряжений, можно утверждать, что наибольшее распространение в экспериментальной и реальной (эксплуатационной) трибодиагностике получили методы, позволяющие осуществлять непрерывный контроль изнашивания подшипниковых узлов. Ряд устройств, реализующих этот метод, разработан для непрерывной оценки линейного износа сопряжений и адаптирован к конструкциям серийных машин трения [830].

Подытоживая рассмотренные выше методы, отметим некоторые перспективные направления развития диагностики износа трущихся сопряжений машин, агрегатов и механизмов.

Заслуживают внимания и всяческого одобрения попытки создания устройств, позволяющих повысить точность измерений путем устранения влияния узла нагружения, а также биений и теплового расширения элементов на измеряемую величину линейного износа испытываемых трибомеханических систем [831].

Одним из перспективных направлений является создание конструкций, оснащенных устройствами-индикаторами износа сопряжений. При этом возможна как качественная, так и количественная визуальная оценка технического состояния узлов [832, 833].

Представляется, что в ближайшие годы значительно большее применение найдут феррографические методы контроля износа сопряжений. Многообещающим, по-видимому, при этом является использование в качестве диагностического параметра индуктивного сопротивления контролируемых смазочных материалов [834]. Можно ожидать также, что ускоренными темпами будут развиваться магнитные и магнитооптические методы диагностики изнашивания смазываемых подвижных сопряжений [835].

В области экспериментальной диагностики износа более широкое применение будут получать компьютеризированные, отличающиеся широкими методическими возможностями, комплекты и тритестеры [761, 780].

Усталостные повреждения деталей узлов трения могут рассматриваться в двух аспектах: объемном и поверхностном. Усталостные поверхностные разрушения являются элементом общей картины фрикционного взаимодействия твердых тел и чаще всего представляются в виде местного или общего износа поверхностей трения. Разрушения в объеме материалов трущихся деталей, проявляющиеся в виде различного рода микро- и макродефектов (полос скольжения, трещин), очень часто имеют своей первопричиной процессы и явления, протекающие на поверхностях трения материалов. В ряде

работ, например [836], предпринимаются небезуспешные попытки связать процессы внешнего и внутреннего трения твердых тел и на этой основе разработать рекомендации общего характера по улучшению их триботехнических характеристик.

Усталостное разрушение материалов рассмотрено в ряде хорошо известных монографий материаловедческой направленности [837, 838]. Диагностика усталостных повреждений материалов, включая вопросы методического обеспечения и используемых при этом технических средств, представлена в работах [839]. Для качественно-количественной оценки отдельных видов усталостных разрушений могут быть также использованы диагностические методы, например, вибродиагностика, рассмотренные в настоящей книге ранее.

Для обнаружения усталостных трещин в валах, соединяющих элетродвигатель с рабочим органом машины, предложен оригинальный метод, заключающийся в измерении колебаний электрических параметров (тока, напряжения) привода и изменяющегося во времени вращающегося момента. Система контроля позволяет предупредить обслуживающий персонал о возникновении повреждения в процессе эксплуатации машины [840].

Можно отметить наиболее интересные и эффективные решения, использование которых будет способствовать дальнейшему прогрессу и развитию современной трибодиагностики.

Все более возрастает роль частиц износа в исследовании изнашивания трибосистем. Исследования позволили установить возможность практического использования существующей зависимости между величиной искажения свободной межфазной поверхности масла и концентрацией в нем механических примесей. На этой основе, в частности, разработан эффективный экспресс-метод определения загрязненности моторных масел, пригодный для использования как в исследовательских целях, так и в условиях реальной эксплуатации машин [841].

Достаточно многообещающим представляется использование зондового метода для оценки параметров граничных слоев и диагностики смазочных свойств используемых материалов [842].

По-видимому, в ближайшие десятилетия ультразвуковая дефектоскопия будет являться одним из основных методов диагностики, в первую очередь, усталостных повреждений деталей трибосистем. Вероятно, что при этом будут широко использоваться новые, отличающиеся высокой эффективностью, модификации известных сегодня методов и устройств [843].

Как уже отмечалось, большие перспективы имеет применение тепловых методов бесконтактной диагностики узлов трения, в частности, методов, основанных на использовании инфракрасного теплового излучения диагностируемых объектов. При этом имеется возможность не только измерять распределение температуры по поверхности, но и в каждый момент времени получать реальное изображение температурного поля исследуемой детали.

Развитие и совершенствование элементной базы будет способствовать повсеместному внедрению в трибодиагностике методов контроля как отдельных деталей, так и сложных конструкций, агрегатов и машин. В качестве датчиков при этом будут широко применяться разнообразные сенсорные устройства.

В экспериментальной диагностике трибосистем получит свое дальнейшее развитие трибоскопия. Новые типы испытательных машин будут оснащаться процессорами цифрового изображения, позволяющими получать визуальные картины характера изменения различных параметров трения в контактной области [844].

Без сомнения, создатели и разработчики трибодиагностических систем будущего будут использовать многовековой опыт развития и совершенствования биологических объектов, окружающей нас природы. Здесь мы считаем уместным привести высказывание выдающегося математика Джона фон Неймана о функционировании и неисправностях технических и биологических систем. Это высказывание является выдержкой из лекции «*Общая и логическая теория автоматов*», прочитанной автором в 1948 году на симпозиуме в г. Пасадине (штат Калифорния), и по нашему мнению не только не потерявшей своей актуальности, но и приобретшей на рубеже XX-го и XXI-го веков новый смысл и звучание.

«*В живых организмах возможны неисправности элементов. Организм, очевидно, может обнаружить и обезвредить их. Следовательно, система должна содержать необходимые устройства, которые позволяют обнаружить возникающие ошибки, отрегулировать организм так, чтобы минимизировать влияние ошибок, и, наконец, исправить или полностью отключить поврежденные элементы. Наш подход к искусственным автоматам совершенно иной. Любую неисправность необходимо обнаружить вскоре после ее появления. Затем также предельно быстро следует изолировать поврежденный элемент. Это можно сделать отчасти автоматически, но в любом случае значительная часть этого диагноза должна быть осуществлена вмешательством извне. Как только поврежденный элемент выявлен, его сле-*

дует немедленно исправить или заменить. Отметим различия в этих двух подходах. Основной принцип приспособления организма к дефектам в природе состоит в том, чтобы сделать их по возможности маловажными и постепенно внести коррективы, если они требуются. С другой стороны, в обращении с искусственными автоматами требуется немедленный диагноз. Следовательно, мы пытаемся построить такие автоматы, чтобы ошибки становились как можно более заметными, а вмешательство и исправление следовали бы незамедлительно. Нетрудно найти рациональное зерно в этом различии. Естественные организмы достаточно хорошо сохраняют работоспособность, даже если появляется дефект. Они могут работать несмотря на дефекты, и их последующая тенденция состоит в устранении этих дефектов. Искусственный автомат можно, конечно, спроектировать так, чтобы он мог работать нормально, несмотря на ограниченное число неисправностей в некоторых ограниченных областях. Однако любая неисправность представляет значительный риск в том смысле, что внутри машины уже установился некоторый общий процесс вырождения. По этой причине следует немедленно вмешаться, поскольку машина, начавшая работать неисправно, редко восстанавливается и скорее всего она будет переходить от плохого состояния к еще худшему».

1.3. Основные факторы, определяющие изнашивание, дилатацию и деформацию трибосистем

Основы теории и экспериментальные исследования изменения линейных размеров трибосистем в разные годы становились предметом внимания: М. П. Александрова, В. А. Балакина, П. Н. Богдановича, Э. Д. Брауна, Н. А. Буше, В. Н. Виноградова, Д. Н. Гаркунова, Ю. Н. Дроздова, Ю. А. Евдокимова, У. А. Икрамова, И. И. Карасика, В. Н. Кащеева, В. И. Колесникова, Л. Ф. Колесниченко, Б. И. Костецкого, И. В. Крагельского, Н. С. Пенкина, Л. С. Пинчука, Б. В. Протасова, Л. Ю. Пружанского, А. А. Рыжкина, В. Г. Савкина, А. И. Свиридёнка, Г. М. Сорокина, П. В. Сысоева, М. М. Тененбаума, В. В. Федорова, И. Н. Черского, А. В. Чичинадзе, Е. А. Чудакова, В. В. Шульца, В. С. Щедрова, Дж. Ф. Арчарда, Х. Блока, Ф. Боудена, Т. Като, А. В. Раффа, Д. Ригни, К. Ридлера, Г. Флейшнера, Р. Хольма и др.

Контроль линейных размеров трибосистем в процессе их лабораторных испытаний или эксплуатации рассматривался в отдельных

работах как отечественных, так и зарубежных ученых [134, 719, 845–850].

Вместе с тем, следует отметить, что системные исследования дилатации трибосистем до недавнего времени практически не проводились, а опубликованные материалы не позволяют получить по возможности целостное представление о рассматриваемом явлении и факторах, его определяющих. Очень часто линейные размеры трибосистем продолжают считать зависящими исключительно от изнашивания и нагревания трущихся деталей. Такая точка зрения, сформулированная на заре становления отечественной трибологии [847], сегодня нуждается в некоторой корректировке.

Анализ соответствующей части информационного поля трибологии позволяет считать, что все факторы, оказывающие основное влияние на размеры подшипниковых узлов, могут быть разделены на две группы, соответственно, увеличивающие или уменьшающие размеры сопряжений. Так, например, к первой группе может быть отнесено тепловое расширение, а ко второй – деформация и изнашивание элементов трибосистем.

Тепловое расширение деталей трибосопряжений является следствием самого феномена трения, обусловливающего рассеяние энергии в зоне фрикционного контакта тел.

Для описания теплового расширения веществ и материалов используют различные обозначения:

1) удельный коэффициент теплового расширения

$$(\partial v/\partial T)_p = e, \ [\text{см}^3/(\text{г}\cdot\text{К})]; \qquad (1.1)$$

2) температурный коэффициент плотности

$$(\partial \rho/\partial T)_p = q, \ [\text{г}/(\text{см}^3\cdot\text{К})]; \qquad (1.2)$$

3) коэффициент теплового расширения

$$1/v\cdot(\partial v/\partial T)_p = \alpha, \ [\text{К}^{-1}]; \qquad (1.3)$$

4) линейный коэффициент теплового расширения

$$1/L\cdot(\partial L/\partial T)_p = \beta, \ [\text{К}^{-1}]; \qquad (1.4)$$

5) мольный коэффициент теплового расширения

$$(\partial V/\partial T)_p = \varepsilon, \ [\text{см}^3/(\text{моль}\cdot\text{К})]. \qquad (1.5)$$

Эти величины связаны между собой следующими соотношениями [851]:

$$e=-\nu^2 q;\ e=\alpha\cdot\nu=\alpha/\rho;\ \alpha=3\cdot\beta;\ q=-e\cdot\rho^2;$$
$$q=-\alpha\cdot\beta=-\alpha/\nu;\ \varepsilon=M\cdot e=\alpha\cdot V=\alpha\cdot M/\rho. \qquad (1.6)$$

Основными причинами тепловыделения при трении считают механическое и молекулярное взаимодействие материалов трибосистем [24, 113]. В ряде случаев количество генерируемого в узле трения тепла пропорционально интенсивности молекулярного (адгезионного) взаимодействия на фактической площади контакта материалов. Как следует из микроскопической модели трения, все процессы, участвующие в образовании и разделении микроконтактов неровностей, вызывают искажения и вибрации решетки, проявляющиеся как тепло. Выделяющееся при трении тепло, очевидно, может либо оставаться внутри системы (действуя как энергия активации изменений материала или химических реакций), либо покидать систему путем конвекции, проводимости или излучения. Важной особенностью выделения тепла является возрастание температуры материальных элементов трибомеханической системы. Так как повышенная температура и градиенты температуры, в свою очередь, влияют на свойства материалов трущихся тел и активируют трибологические процессы, знание генерируемых трением температур имеет первостепенное значение для трибологии [577]. Следует отметить также довольно большую роль тепловых потоков и особенно их распределения между элементами трибосистем [24].

Вызываемые трением приращения температуры можно разделить на три группы: объемное повышение температуры, градиенты температуры и местные повышения температуры или «температурные вспышки» [577].

В общем случае преобладающая часть работы внешнего трения превращается в теплоту, остающаяся меньшая часть идет на изменение внутренней энергии поверхностных слоев материалов. При отсутствии заметных остаточных деформаций поверхностных слоев можно считать, что вся работа внешнего трения трансформируется в теплоту [38].

В работе [852] отмечается, что при трении металлов с умеренными давлениями и скоростями скольжения, источниками тепла на поверхности трения являются вершины микронеоднородностей, которые с частотой ν взаимодействуют друг с другом. Высокие нагрузки, сопровождающиеся схватыванием поверхностей, вызывают темпе-

ратурные вспышки, которые происходят с другой частотой. При этом в высоконагруженных узлах трения возможно возбуждение автоколебаний, частота которых совпадает с частотой тепловых воздействий в зоне фрикционного контакта тел.

Большим достижением трибологической науки конца двадцатого века явилось установление того, что выделяемая при трении тепловая энергия локализуется на вытянутых в направлении скольжения пятнах, форма которых близка к эллиптической, средний размер ограничен 250 мкм, а время излучения может различаться на 3–4 порядка. При увеличении скорости скольжения, нагрузки и уменьшении модулей упругости сопрягаемых тел пятна становятся более вытянутыми, увеличивается их площадь и интенсивность теплового излучения. Наблюдаемое в процессе изнашивания явление перемещения пятен коллинеарно вектору скорости обусловлено разрушением и пластическим деформированием неровностей контактирующих поверхностей, а направление этого перемещения – соотношением механических свойств и сопротивления изнашиванию элементов пары трения. Установлено, что максимум температуры, как правило, расположен вблизи центра пятна контакта и может с течением времени незначительно смещаться вследствие частичного разрушения контактирующей неровности. За время существования локального источника тепла изменяются его форма, размеры и интенсивность теплового излучения. При этом аккумуляция тепловой энергии в объеме контактирующей неровности происходит ступенчато, а период достижения максимума температуры более длителен, чем период ее спада. Максимальная температура пятен контакта может отличаться на сотни градусов, а ее абсолютный максимум – достигать температуры деструкции материала одного из элементов пары трения [850]. Исследования позволили также установить подобие протекания тепловых процессов при фрикционном нагружении металлов и полимерных материалов. Это подобие подтверждается локализацией теплового излучения на пятнах фактического контакта металлов и полимеров с контртелом, аналогией закономерностей влияния режимов нагружения на максимальную температуру источников теплового излучения, а также близкими по форме кривых распределением температуры на единичных пятнах контакта [850].

К схожим результатам пришли и авторы работы [853], изучавшие тепловые процессы при высокоскоростном трении твердых тел. Они считают, что вследствие шероховатости трущихся поверхностей тепловыделение происходит в отдельных дискретно расположен-

ных точках фактического контакта, находящихся под различными нормальными давлениями. Обычно полагают, что точки фактического контакта распределяются с равномерной плотностью по номинальной площади касания. Однако, в результате интенсивного тепловыделения, высоких температур и температурных градиентов в области контакта возникают горячие зоны, которые вследствие износа, термоупругих и термопластических деформаций поверхностных слоев могут перемещаться по поверхности трения. Наличие горячих зон наблюдалось при испытаниях колодочных железнодорожных и дисковых тормозов, а также при испытаниях уплотнений.

Установленная экспериментально способность пятен (зон) перемещаться по поверхностям контакта тел, по нашему мнению, может позволить объяснить целый ряд особенностей процессов массопереноса в узлах трения.

Наряду с температурными вспышками, ударный характер взаимодействия поверхностей трущихся тел (пара трения полимер–металл) способен приводить к пиролитическим превращениям (распаде на элементарные компоненты) наиболее легкоплавкого элемента трибосистемы в местах существования локальных очагов разогрева вблизи точки соударения.

Весьма интересными представляются результаты работы [854], в которой на примере цилиндрических эвольвентных передач рассматривается соответствие трех стадий температурной вспышки трем стадиям процесса заедания трущихся пар. Места максимальной температуры на активных поверхностях зубьев одновременно являются местами минимальной выносливости в условиях заедания.

Обобщающий анализ температурных вспышек был проведен Дж. Дж. Арчардом. Ввиду большой важности этой теории для многих задач трибологии, приведем основные результаты разработанной им теории, воспользовавшись при цитировании доступной нам работой [577]. Использованная модель показана на рис. 1.1.

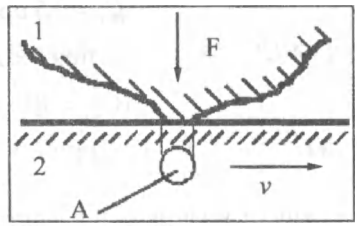


Рис. 1.1. Модель скользящей поверхности (по Дж. Дж. Арчарду)

Поверхность неровности тела 1 образует круговую площадь контакта $A=\pi r^2$, которая движется со скоростью v по плоской поверхности тела 2. Температуры рассчитывались на основе допущений о том, что тепло выделяется на истинной площади контакта и отводится в объем трущихся тел. Сначала составлялись и решались уравнения потоков тепла в каждое тело. Полученные температуры поверхности выражались через интенсивность тепловыделения, размер и скорость источника тепла, а также тепловые свойства материалов. Далее полный поток тепла распределялся на потоки внутрь каждого тела из условия, что при одинаковых тепловых потоках к обоим телам средняя температура на поверхности контакта постоянна. В зависимости от рабочих условий, т. е. нагрузки F и скорости v, природы тел и вида деформации выведены различные формулы. Для случая пластической деформации неровностей тел из одного и того же материала с использованием обозначений

$$N=\frac{\pi f g p_y}{J\rho c} \text{ и } L=\frac{F^{1/2}N^{v}}{2\eta'(\pi p_y)^{1/2}}, \qquad (1.7)$$

где f – коэффициент трения; g – ускорение силы тяжести; p_y – давление текучести; J – механический эквивалент тепла; ρ – плотность; c – удельная теплоемкость; η' – температуропроводность ($\eta'=k/\rho c$) и k – коэффициент теплопроводности, получены следующие выражения для максимального приращения температуры за счет трения (ΔT):

$$\Delta T_{max}=0{,}25\cdot NL \quad \text{при } L<0{,}1$$

$$\Delta T_{max}=0{,}25\cdot C_1 NL \quad \text{при } 0{,}1<L<5$$

($C_1=0{,}95$ при $L=0{,}1$; $C_1=0{,}5$ при $L=5$);

$$\Delta T_{max}=0{,}435\cdot C_2 NL^{1/2} \quad \text{при } 5<L<100$$

($C_2=1/[1+0.87L^{-1/2}]$),

$$\Delta T_{max}=0{,}435\cdot NL^{1/2} \quad \text{при } L>100.$$

Температурные вспышки возникают на пятнах фактического контакта фрикционно взаимодействующих материалов. Время существования такого единичного пятна (теплового источника) состав-

ляет около 10^{-7}–10^{-8} с [24].

Температурное поле поверхностного слоя при трении характеризуется как непосредственно температурой самой поверхности, так и распределением (градиентом) температур в тонком поверхностном слое [102].

Изменение температуры поверхностей при внешнем трении твердых тел происходит по достаточно сложной зависимости, имеющей несколько экстремальных точек. Считают, что это связано с разогревом поверхностей в условиях упругопластических микро- и макродеформаций и процессами изменения структуры тонких поверхностных слоев материалов [30].

Максимальная температура в высокоскоростных узлах трения несколько смещена по горизонтали в направлении вращения подвижной детали и связана с направленностью сдвиговых деформаций поверхностных слоев материалов. При этом на выходе детали из зоны контакта температура всегда более высокая, чем на входе, независимо от направления вращения деталей [855].

На возможность существования связи поверхностных градиентов температуры с фрикционно-износными характеристиками материалов неоднократно указывалось в работах ряда известных ученых, например, [102, 455]. Но только в 70–90-х годах двадцатого века благодаря трудам, в первую очередь, российских трибологов, появились первые фундаментальные работы в этом направлении [134, 856]. К числу одного из основных результатов этих исследований может быть отнесено установление существования подповерхностного максимума температуры – отрицательного температурного градиента, возникающего за счет смены граничных условий зоны фрикционного контакта. С понижением объемной температуры и увеличением положительного градиента температуры износ подшипника и вала уменьшается. При повышении объемной температуры и создания отрицательного градиента по глубине поверхностного слоя износ подшипника значительно возрастал, а вала – уменьшался.

Для металлополимерных сопряжений установлено, что общий эффект от воздействия температуры и температурного градиента отклоняется от правила аддитивности, а температурный интервал, характеризующий определенный вид изнашивания и переход его в другой, может быть сдвинут в сторону увеличения или уменьшения поверхностной температуры в зависимости от величины и знака температурного градиента [857].

Для правильной оценки температурных градиентов, поверхнос-

тных и объемных температур необходимо учитывать существование и влияние пластической деформации в тонких поверхностных слоях материалов. Тепловым режимом зоны трения можно управлять, подбирая материалы пары трения в зависимости от их теплофизических свойств, изменяя условия теплообмена и применяя тонкослойные покрытия [858].

Значения поверхностных температур позволяют не только изучать переходные режимы трения, изнашивания и смазывания трибосопряжений, но и использовать эти температуры в качестве диагностических критериев узлов трения. Например, в работе [355] возникновение механических релаксационных колебаний силы трения при испытании смазок температурным методом связывают с утратой смазочным слоем способности разделять поверхности трущихся тел.

Теоретический расчет температуры в трибосистеме представляет большие трудности, так как связан с необходимостью решения задачи Фурье при весьма сложных граничных и начальных условиях.

Кроме поверхностной температуры важным является также распределение тепла в элементах трибологической системы: обоих контактирующих телах, промежуточном (третьем) теле и окружающей среде.

Безразмерная величина a, показывающая, какая часть теплового потока направляется в одно из контактирующих тел, называется коэффициентом распределения теплового потока. Считают [24], что распределение тепла между трущимися элементами соединений может быть описано следующими зависимостями:

$$Q_1 = (1-a)\cdot Q \text{ и } Q_2 = a\cdot Q, \qquad (1.8)$$

где Q – общее количество тепла, выделившегося в трибосистеме; Q_1 и Q_2 – количество тепла, поступающего в первый и второй элементы (тела).

Тепловые потоки в смазываемых трущихся сопряжениях могут быть также найдены из следующего выражения [859]:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\sqrt{\frac{a_2}{a_1}}, \qquad (1.9)$$

где λ_1 и λ_2, a_1 и a_2 – теплопроводности и температуропроводности тел, соответственно.

Ряд других теплофизических характеристик контакта двух металлических поверхностей может быть рассчитан по зависимостям, приведенным в монографии [860].

Экспериментально показано, что при сухом трении металлических материалов распределение генерируемого теплового потока происходит пропорционально контактным податливостям трущихся поверхностей, при этом наблюдается увеличение теплового потока в сторону тела с большей податливостью (меньшим модулем упругости). В процессе приработки происходит автономная перестройка микрорельефа, в результате которой распределение изменяется и становится пропорциональным тепловым потокам, отводимым из зоны трения [848, 849].

Отсутствие надлежащей теоретической базы и методологии экспериментальных исследований не позволяет сегодня эффективно изучать тепловыделение в так называемом третьем теле трибологической системы. Нам представляется, что роль тепловых процессов в образовании, работе и изнашивании третьего тела и трибосистемы в целом является определяющей.

В ряде случаев, применительно к процессам торможения современных машин и механизмов, происходящим в течение непродолжительного промежутка времени, теплоотдачей в окружающую среду (обычно воздух) пренебрегают [24]. Результаты работы [861] свидетельствуют о том, что путем выбора соответствующих критериев можно оценить условия, при которых в каждом конкретном случае можно пренебречь теплоотдачей в окружающую среду. В качестве таких критериев могут быть отношения тепловых потоков, характеризующих интенсивность теплообмена трущихся тел с окружающей средой, к тепловым потокам, направленным в эти тела из зоны фрикционного контакта.

При изменении температуры поверхности трения изменяются все механические, физические и химические свойства материалов трибосистем [455]. Причем, несмотря на то, что это происходит преимущественно в тонких поверхностных слоях контактирующих тел, имеют место также изменения некоторых параметров и всего остального объема материалов.

Теплота, возникающая при трении, может существенно влиять на изменение структуры и свойств поверхностей трения, вызывать распад предварительно упрочненных метастабильных структур, изменять прочность межатомных связей, вызывать аллотропические превращения и соответствующие изменения свойств триботехничес-

ких материалов. Влияние теплоты трения связано также с изменением констант диффузии, адсорбции и ряда других физико-химических процессов, протекающих на поверхностях трения [30]. Одним из таких процессов, оказывающим заметное влияние на триботехнические свойства узлов трения, является окисление материалов [38]. Исследования позволили установить зависимости влияния температуры и температурного градиента на величину и полярность трибоэлектризации полимерных материалов, а также выявить взаимосвязь трибоэлектрических и диффузионных процессов с механизмом водородного изнашивания металлополимерных трибосопряжений [856].

Для некоторых сочетаний материалов в трущихся сопряжениях температура в зоне трения является основным фактором, определяющим переход от нормального режима изнашивания к катастрофическому. Например, при трении без смазочного материала полиоксиметилена по стали при температуре до 400 К основным механизмом изнашивания является послойное срезание полимера. Выше этой температуры наступает ускоренное изнашивание материала в результате оплавления поверхностного слоя и его удаления с поверхностей трения, а также вследствие термической деструкции полимера, понижающей его сопротивление износу [862].

Использование законов термодинамики необратимых процессов позволило для стационарного теплового режима установить зависимость между температурными и износными характеристиками элемента пары трения [863].

Высокие температуры, имеющие место при трении и достигающие температуры плавления материалов трибосопряжений, могут привести к такому нежелательному эффекту, как схватывание с последующим вырывом элементов поверхностных слоев материалов, их свариванием и возникновением задира [24].

Совершенно очевидно, что тепловое расширение оказывает значительное влияние на площади касания, напряженное состояние, линейные размеры трибосопряжений и др. Это, в свою очередь, должно учитываться при расчетах и экспериментальном определении параметров трибосистем.

Пренебрежение тепловым расширением в процессе износных испытаний дает погрешность по отношению к фактическому износу (разную для различных материалов) от 9 до 43 % [864]. Необходимость оценивать тепловое расширение отпадает в случае, когда температуру испытываемого узла трения поддерживают на уровне ис-

ходной от начала до конца испытания, а также, когда линейный износ определяют только после окончания испытания и охлаждения или пересчетом по потере массы изнашиваемыми элементами системы.

Современное состояние теоретических и экспериментальных методов исследований во многом определяет глубину наших знаний о природе тепловых явлений, сопровождающих трение твердых тел.

При проведении теплофизических исследований трибосистем все чаще используются современные методы моделирования и планирования экспериментов [133, 134, 848]. Большими возможностями при изучении тепловой картины трения обладает также метод микрокалориметрии [866].

Дальнейшему прогрессу трибологии способствуют оригинальные методики расчета теплового режима работы сопряжений. Например, в работе [867] предложена методика расчета температуры поверхностей трения, одна из которых имеет тонкослойное полимерное покрытие, позволяющая произвести предварительный выбор полимерного материала для покрытия с учетом его температурных характеристик.

Недостатком некоторых методов экспериментальной оценки и теоретического расчета уровня температуры, достигаемой на фактических площадках контакта (ФПК), является то, что они слабо учитывают влияние металловедческих факторов – протекания в поверхностном слое полиморфных и фазовых превращений. Колебания температуры на ФПК происходят в пределах между средней температурой поверхности трения и точкой ближайшего полиморфного превращения или (если такового нет) плавления металла [868].

Рассмотрение полного цикла подвода – преобразования – рассеивания энергии в трибомеханической системе свидетельствует о многообразии участвующих в трении процессов и явлений. Хотя при помощи современных методов экспериментирования можно изучить отдельное изолированное явление, обычно имеет место наложение и взаимодействие различных процессов.

Деформация в трибосистемах происходит на разных масштабных уровнях. Учет этого обстоятельства представляется достаточно важным с точки зрения исследования влияния и оценки величины вклада отдельных факторов, определяющих в совокупности общую деформацию узла трения.

Деформация является одним из основных процессов, обусловливающих протекание внешнего трения. Уже в течение нескольких сто-

летий деформационные процессы и явления при трении остаются непреложной частью большинства фундаментальных исследований [24, 28, 30, 38, 75, 98, 868, 869].

Анализ материалов по изучению процессов, происходящих на поверхностях и в приповерхностных слоях материалов при трении, смазке и износе, позволяет прийти к заключению, что основное содержание внешнего трения обусловлено упругопластической деформацией, определяющей главные физико-механические характеристики поверхностей и вызывающей производные физико-химические явления в зоне контакта. В своем макроскопическом проявлении упругопластическая деформация обусловливает закономерности формирования площади контурного контакта трущихся поверхностей. Атомные механизмы пластической деформации обусловливают развитие микро- и субмикрогеометрических параметров поверхности, что является важным фактором в образовании поверхностных связей [30].

С точки зрения деформации трибосистем наибольший интерес представляют пластические деформации материалов, природа которых хорошо изучена и достаточно подробно рассмотрена в работах [75, 870].

Особенность напряженного состояния при внешнем трении определяется совместным действием нормальных и тангенциальных поверхностных сил при гидростатическом давлении внутренних объемов материалов. С точки зрения теории несовершенных кристаллов (теории дислокаций) пластическая деформация осуществляется путем перемещения и размножения дислокаций. В процессе пластической деформации возникает большая и неравновесная концентрация вакансий и дислоцированных атомов, которые образуются в результате движения дислокаций со ступеньками, рекомбинации отрезков дислокаций противоположных знаков, поперечного скольжения дислокаций, а также неполной аннигиляции сегментов дислокаций противоположных знаков, проходящих близко друг от друга в соседних плоскостях скольжения. В этих условиях деформация осуществляется механизмами трансляции, двойникования, поворота зерен и фрагментов в направлении действия тангенциальных сил. В местах непосредственного контакта происходит направленная деформация – текстурирование поверхностных микрообъемов материала, в результате чего возникает анизотропия механических, физических и химических свойств. В монографии [38] цитируется работа И. А. Одинга, предложившего одиннадцать возможных механизмов пластичес-

кой деформации и подразделившего их на три группы. В первую группу входят сдвиговые процессы, во вторую – диффузионные, в третью – процессы пластической деформации, вызванные относительным перемещением зерен, блоков зерен и границ или, так называемые, периферийные процессы. Характерной особенностью первой группы является дислокационный механизм скольжения, проявляющийся в перемещении одной части кристалла или зерна по отношению к другой.

В работе [871] отмечается, что имеющийся значительный экспериментальный материал позволяет утверждать, что подповерхностные слои мало подвержены пластической сдвиговой деформации и лишь определяют условия нагружения зоны фрикционного взаимодействия, при которых течение вещества сосредоточивается в чрезвычайно тонких поверхностных слоях.

Пластическое течение на поверхности при трении усиливает процессы массопереноса, что обусловлено «ротационным» характером деформации с относительным разворотом фрагментов структуры преимущественно вокруг оси, перпендикулярной направлению трения и параллельно поверхности скольжения. Такой механизм ротационной пластичности, связанный с диффузией атомов и вакансий вдоль границ зерен и фрагментов, обеспечивает в поверхностном слое трущихся тел чрезвычайно большие пластические деформации, которые выражаются в формировании наплывов по краям образца [872].

По-видимому, в общем случае процесс микропластической деформации в приповерхностных слоях кристаллических материалов можно разделить на две основные стадии. На первой (начальной) стадии аномальное поведение выражается в облегченном образовании и движении дислокаций в приповерхностных слоях по сравнению с внутренними объемными. Проявление второй стадии (барьерный эффект поверхности) можно рассматривать как неизбежное следствие первой стадии аномального пластического течения, т. е. следствие того, что все стадии деформационного упрочнения на кривой «напряжение–деформация» у поверхности как бы сдвинуты по «фазе». Они опережают по времени аналогичные стадии объемной деформации и протекают у поверхности быстрее. В результате этого вблизи поверхности образуется слой с повышенной плотностью дислокаций, который препятствует выходу полос скольжения на поверхность кристалла и тормозит развитие объемной деформации. Таким образом, в данном случае эффект меняет знак, т. е. облегченные условия деформации вблизи поверхности кристалла сменяются более затруд-

ненными [873]. Эффективность развития представлений о стадийном характере пластической деформации подтверждается также данными, приведенными в работе [874].

При малых коэффициентах трения, наиболее часто встречающихся на практике, большинство наиболее важных компонентов напряжений деформаций и подводимой энергии достигают максимальных по величине значений не на поверхности, а на некоторой глубине. Поэтому детальное изучение процессов, сопровождающих трение и изнашивание твердых тел, невозможно без всестороннего анализа и учета особенностей напряженно-деформированного состояния глубинных слоев сопряженных шероховатых поверхностей. Необходимо также учитывать и то, что высокочастотное изменение напряжений и деформаций в приповерхностных слоях трущихся тел даже при относительно малых скоростях скольжения может служить причиной возникновения высокочастотных колебаний [875].

При неблагоприятных условиях работы трибосистемы, однако, может возникать макродеформация, приводящая к значительному повреждению поверхностей трения. Пластическую макродеформацию следует рассматривать как патологический вид износа, приводящий к необратимому и разрушительному повреждению поверхностей трущихся деталей [876].

Результатом пластического деформирования может быть упрочнение материалов и, как следствие, изменение комплекса их физико-механических свойств.

Установлено, что наклепанный металл запасает от 5 до 10 % энергии, затраченной на деформирование. Эта запасенная энергия расходуется на образование дефектов решетки (плотность дислокаций возрастает до 10^9–10^{12} $см^{-2}$) и на ее упругие искажения. Свойства наклепанного металла изменяются тем сильнее, чем больше степень его деформации. При деформировании увеличиваются прочностные характеристики и понижаются пластичность и вязкость. Металлы интенсивно наклепываются в начальной стадии деформирования, затем при возрастании деформации механические свойства изменяются незначительно [166].

Резкое увеличение концентрации вакансий и дислоцированных атомов при пластической деформации в процессе трения вызывает активизацию поверхностных объемов металлов и развитие явлений диффузии. При нормальных условиях трения своеобразная активизация металла и развитие диффузионных явлений приводят к окислению поверхностных слоев трущихся металлов. Эти же причины при

нарушении нормальных условий эксплуатации могут вызвать недопустимые явления схватывания. Применение теории дислокаций позволило раскрыть единую природу окисления и схватывания при трении – активизацию металла поверхностных слоев, обусловленную развитием несовершенств кристаллического строения при пластической деформации [38].

Очевидно, что явления повреждаемости при внешнем трении являются результатом как непосредственного действия упругопластической деформации, так и влияния всех производных от нее явлений. Важнейшими производными при внешнем трении являются:

1) особая активизация металла поверхностных слоев и связанное с этим резкое усиление диффузионных процессов на поверхностях контакта (окисление и схватывание сопряженных поверхностей);
2) теплота трения;
3) упрочнение, разупрочнение, диспергирование;
4) усталостные процессы.

Возникновение и преобладающее развитие тех или иных производных явлений при внешнем трении, вызванных пластической деформацией, коренным образом связано с внешним механическим воздействием на поверхности трения, свойствами материалов трущейся пары, а также средой в зоне трения. Существенное значение имеют также масштабный фактор, напряженное состояние и фактор времени. Вторичные (производные) процессы, неизбежно возникающие при трении, оказывают определяющее влияние на закономерности внешнего трения твердых тел [30].

Кроме того, основные и производные процессы могут оказывать значительное влияние на точность оценки ряда характеристик, например, линейного износа трибосистем. Объективная оценка результатов износных испытаний должна производиться с учетом того, что упрочнение поверхностных слоев, как установлено в [38], сопровождается увеличением удельного объема в них и возникновением остаточных напряжений сжатия 1 рода.

Тепловые деформации при трении могут существенно изменять топографические параметры поверхностей композиционных материалов [877].

Наряду с изменением топографии поверхности материалов и их механических свойств пластическая деформация увеличивает физико-химическую активность поверхностных слоев. От степени активности поверхности зависят строение и свойства граничных слоев смазки, протекание явлений физической и химической адсорбции,

возможность возникновения схватывания [38].

Процесс развития микротрещин усталости и сопротивления поверхностного слоя композиционного полимерного материала фрикционной усталости определяется величиной и соотношением компонент тензора деформаций, а также соотношением деформаций растяжения и сжатия в каждом цикле нагружения [878].

Важной особенностью фрикционных процессов является образование специфических структур в тонких поверхностных слоях материалов. Решающую роль в структурообразовании играет деформация. Так, например, в работе [879] отмечается, что особенность механизма пластического течения при трении заключается в том, что наряду с изменением плотности материала, появлением текстуры, изменением величины зерна, возникают нарушения правильности строения кристаллической решетки, качественно отличные от тех, которые имеют место при пластическом растяжении и сжатии.

Под влиянием неоднородного нагревания или охлаждения, наклепа и фазовых превращений в металлах возможны изменения периода решетки, область гомогенности которых соизмерима с макроскопическими размерами тела. Этой макродеформации решетки соответствуют макронапряжения (напряжения 1 рода), которые могут вызвать хрупкое разрушение металла, его коробление и образование трещин при закалке. Остаточные макронапряжения могут несколько повышать предел усталости, если их знак противоположен знаку напряжений, вызываемых действующей нагрузкой [879].

При многократном тепловом и силовом воздействии на поверхностные слои при трении возникают значительные диффузионные потоки атомов, проходящие на глубину до нескольких десятков микрометров. Направление диффузионного потока атомов определяется градиентами давления и температуры по глубине поверхностного слоя. Результирующий диффузионный поток атомов направлен в сторону контакта сопряженных поверхностей, причем поскольку при трении осуществляется микродиффузионный характер процесса, структурные изменения и диффузионное перераспределение происходят в отдельных микроскопических объемах [599].

Кинетика структурных изменений при трении обусловлена процессами пластической деформации, приводящими к накоплению дефектов кристаллического строения металла. Наблюдается последовательная трансформация структуры, состоящая в увеличении плотности дислокаций, образовании их скоплений, формировании ячеистой, а затем фрагментированной структуры, характеризующейся наличием

критических стыков между соседними фрагментами, разориентированными на несколько градусов. В начальный период трения на отдельных участках после одинаковой наработки наблюдается широкий спектр структур, соответствующих различным величинам пластической деформации, что, очевидно, обусловлено дискретностью контакта при трении. С увеличением длительности испытаний структура поверхностного слоя становится более равномерной и при постоянных режимах трения стабилизируется [880].

При трении материалов, состоящих из кристаллической и аморфной фаз, пластическому деформированию подвергается аморфная, а не кристаллическая фаза [255].

При трении без значительного тепловыделения, приводящего к фазовым превращениям в материале и активному взаимодействию его с окружающей средой, а также в случаях, когда перенос материала с одного тела на другое и микрорезание малы, пластическая деформация в местах реального контакта является основной причиной разрушения поверхностного слоя [879].

Отмечается существенная разница между процессами пластической деформации при различных видах изнашивания в зависимости от их интенсивности. Деформационное упрочнение при окислительном изнашивании достаточно для предотвращения разрушения металла – изнашиваются в основном пленки окислов. При усталостном изнашивании происходит накопление пластической деформации тем большее, чем выше величина действующих нагрузок при трении. Интенсивность изнашивания обратно пропорциональна размерам фрагментов поверхностного слоя металла. Противоположная закономерность наблюдается при адгезионном изнашивании – накопление пластической деформации тем меньше, чем выше интенсивность изнашивания. Критерием перехода от преимущественно усталостного к преимущественно адгезионному изнашиванию является образование минимальных по размеру фрагментов поверхностного слоя металла при трении [881].

Влияние деформации в ряде случаев может быть сопоставимо, а иногда и значительно превышать то влияние, которое оказывает на изменение линейных размеров изнашивание элементов трибосистемы. Это подтверждается результатами работы [882], в которой (для сопряжения с коэффициентом взаимного перекрытия близким к нулю) установлено, что интенсивность линейного износа за счет изменения массы от 10 до 15 раз меньше интенсивности линейного износа за счет пластической деформации. Это позволяет сделать заключе-

ние, что такие режимы фрикционного разогрева от трения скольжения (когда движущийся элемент сделан из эластичного материала) сопровождаются благодаря нормальным и касательным силам на 80–95 % необратимым изменением формы образца и лишь на 5–20 % изменением линейного размера тел вследствие износа за счет истирания контробразца.

Разработка методов управления деформацией трущихся деталей может являться эффективным способом повышения долговечности узлов трения.

Уменьшить влияние температурных деформаций на работу точных сопряжений машин можно путем обеспечения постоянства температурных полей в окружающей среде, уменьшения неравномерного нагрева сопряжения от внутренних источников тепла, одним из которых является трущаяся пара, оптимального выбора материалов для деталей узлов трения, оптимизации режимов эксплуатации трибосистем и др.

Открытие эффекта адсорбционного понижения прочности твердых тел, преимущественно металлов, в присутствии поверхностно-активных веществ и интенсивное развитие физико-химической механики позволили разработать ряд высокоэффективных способов регулирования прочностных и деформационных свойств материалов, в том числе и триботехнического назначения. Значительному углублению представлений о природе пластической деформации материалов способствовало установление А. Ф. Иоффе и П. С. Эренфестом в 1924 году скачкообразной деформации металлических монокристаллов. Представленные в [883] данные свидетельствуют, что временные микронеоднородности деформации – явление весьма общего характера. Учитывая, с нашей точки зрения, большое теоретическое и практическое значение результатов этой работы, приведем некоторые результаты исследований деформационных скачков металлических материалов. Быстрые деформационные скачки наблюдаются особенно часто и в широком интервале ориентировок у монокристаллов с преимущественной системой скольжения (цинк, кадмий–гексагональная компактная структура), малые ускорения характерны для скольжения в большом числе систем (свинец, алюминий–кубическая гранецентрированная решетка); тетрагональная решетка белого олова занимает промежуточное положение. Число наблюдаемых скачков возрастает с уменьшением их величины; большая вероятность появления малых скачков показывает, что минимальной величины скачка, по-видимому, не существует.

Вероятно, перспективной следует считать попытку объяснить и предложить методы управления процессами деформации и изнашивания материалов исходя из теории колебаний и волнового (энергетического) взаимодействия элементов композиционных полимерных систем [884].

Классическими следует считать методы управления деформационными и износными характеристиками путем создания положительного градиента механических свойств в поверхностных слоях триботехнологических материалов, например, нанесением тонкослойных покрытий и смазок [24, 113, 507].

Изнашивание является основной причиной, обусловливающей потерю работоспособности большинства трущихся сопряжений машин и механизмов.

Исследованию изнашивания материалов посвящены многочисленные монографии и публикации обобщающего характера [14, 24, 30, 31, 38, 101, 113, 135, 198, 199, 234, 850, 884–887].

Согласно немецкому стандарту DIN 50321, изнашивание можно обнаружить, измеряя такие «прямые» величины, как:

а) изменения геометрической формы образцов, а именно линейных размеров, поперечных сечений, объема;

б) изменения массы образцов;

в) количество изношенного материала,

а также измеряя такие «относительные» величины (т. е. интенсивность изнашивания), как:

г) отношение величины износа ко времени (скорость изнашивания);

д) отношение величины износа к пути скольжения (интенсивность изнашивания);

е) коэффициент износа, определяемый соотношением

$$K = \frac{\text{объемный износ}}{\text{нагрузка} \times \text{путь скольжения}} \left(\frac{\text{мм}^3}{\text{Н} \cdot \text{м}} \right); \qquad (1.10)$$

ж) безразмерный коэффициент износа, предложенный Арчардом,

$$K = \frac{\text{объемный износ} \times \text{твердость}}{\text{нагрузка} \times \text{путь скольжения}}. \qquad (1.11)$$

Закономерности динамики изнашивания трибосистем представлены в ряде фундаментальных работ [24, 30, 38, 113, 886].

Авторы обзора [887], посвященного анализу основных закономерностей изнашивания твердых материалов, считают, что на износ материалов влияют: вид изнашивания, кристаллическая структура, ориентация кристаллов, анизотропия механических свойств, химия поверхностного слоя.

Установлено, что износ является результатом совместного действия тепловых и механических факторов. Фрикционный нагрев приводит к протеканию трибохимических реакций на пятнах контакта. Площадь пятен контакта, на которых достигается температура начала протекания реакции, зависит от интенсивности теплоотвода в окружающую среду и определяется коэффициентом эффективной теплопроводности [888].

Интенсивность изнашивания определяется механизмами объемного и поверхностного разрушения и ориентацией трещин в поверхностных слоях материалов [37, 563]. Считают, что область наиболее интенсивного накопления микроповреждений, первоначально расположенная на некоторой глубине, в процессе трения будет смещаться к поверхности, а поэтому с течением времени может существенно измениться и весь характер разрушения трущихся тел [889].

Предложена методика борьбы с изнашиванием деталей машин, основанная на классификации видов разрушения поверхностей трения по признаку ведущего процесса [38].

Трудно даже перечислить все попытки осуществить классификацию видов изнашивания, выполненные только в последние десятилетия. Пожалуй, отметим одну из первых работ в этом направлении, опубликованную М. М. Хрущовым в 1953 году [890], и отправим читателя к многочисленным статьям и монографиям [17, 21, 24, 69, 113, 142, 191, 370, 577, 876]. Вместе с тем, как отмечается в работе [782], общепринятой классификации видов изнашивания к настоящему времени не создано. С нашей точки зрения это объясняется отсутствием единого методологического подхода к решению проблемы. Ситуацию можно было бы существенно поправить путем тщательного контроля входов и выходов испытываемых трибосистем и унификации методов проведения и представления результатов трибологических испытаний. Работы в этом направлении должны проводиться с учетом того, что износостойкость не является фундаментальным свойством материалов и зависит от значений элементов, входящих в состав испытываемых трибосистем.

В известной мере успеху будут также способствовать достижения в области методического обеспечения и идентификации основ-

ных видов процессов изнашивания материалов.

Кратко отметим основные результаты, достигнутые при исследовании видов изнашивания материалов триботехнического назначения: металлов, полимерных композитов, керамики, графитопластов и др.

Абразивное изнашивание является одним из наиболее распространенных и быстро протекающих видов механического изнашивания деталей машин путем режущего или царапающего действия твердых тел или твердых частиц.

Абразивному изнашиванию подвергаются детали сельскохозяйственных, дорожно-строительных, горных машин и оборудования, шасси самолетов, детали подвески и кузова автомобилей, элементы железнодорожного подвижного состава, трубы и насосы земснарядов, бурильное оборудование нефтяной и газовой промышленности, трубопроводы и др.

Изучению закономерностей абразивного изнашивания посвящены многочисленные статьи, обзоры и монографии [142, 584, 776, 778, 891].

При классификации видов изнашивания учитывают степень закрепленности твердых частиц (абразива), а также характер его воздействия на изнашиваемую деталь [891].

Интенсивность изнашивания I_h свободными абразивными частицами достаточно точно описывается уравнением

$$I_h = b_0 v^m, \qquad (1.12)$$

где b_0 и m – константы; для стали $m = 2{,}2$ [892].

Абразивная износостойкость материалов прямо пропорциональна механической составляющей работы трения (изнашивания) и обратно пропорциональна адгезионному взаимодействию контактирующих поверхностей [893].

Абразивная износостойкость зависит также от прочности межатомных связей в решетке. Экспериментально установлено влияние на величину абразивного износа материалов модуля нормальной упругости, параметра $\theta^2 A$ (где θ – характеристическая температура по Дебаю; A – атомный вес), теплосодержания расплавленного металла, отношения абсолютной температуры плавления к атомному объему $T_{пл}/V_A$, энергии активации W, самодиффузии Q:

$$\varepsilon \sim E^{1,3}; \varepsilon \sim (\theta^2 A)^{1,7}; \varepsilon \sim W^2; \varepsilon \sim (T_{пл}/V_A)^{4/3}; \varepsilon \sim Q^2. \qquad (1.13)$$

Здесь ε – относительная износостойкость испытуемого материала и материала, принятого за эталон, в одинаковых условиях эксперимента [142].

Основополагающие результаты исследований абразивного изнашивания были получены М. М. Хрущовым [759, 890]. Получено выражение для оценки объема износа V в зависимости от нормальной нагрузки N, пути трения S, начальной твердости металла H, размера абразивного зерна a:

$$V = c\frac{NSa}{H}, \tag{1.14}$$

где c – коэффициент, зависящий от абразивных свойств истирающей поверхности, условий взаимодействия контактирующих тел, кинематики движения и закрепления абразива, остроты ребер абразива.

Кроме того, были установлены следующие закономерности:

- величина износа при постоянных условиях прямо пропорциональна пути трения;
- величина износа при прочих постоянных условиях не зависит от скорости трения, следовательно, скорость изнашивания прямо пропорциональна скорости трения;
- величина износа при прочих постоянных условиях прямо пропорциональна величине нормальной нагрузки.

Исследования позволили установить, что абразивный износ детали уменьшается как с ростом ее твердости, так и с увеличением твердости сопрягаемой детали [894]. При твердости металлической поверхности, превышающей 60 % твердости абразива, износостойкость резко возрастает (данные М. М. Тененбаума).

Считают [577], что абразивная износостойкость зависит только от твердости материала. По этой причине абразивную износостойкость можно определять через твердость материала как одну из разновидностей его «трибологических свойств».

Вместе с тем, имеются данные о том, что твердость неоднозначно определяет износостойкость. Существенна физическая природа того, чем обусловлена твердость металла (стали) [895].

Использование энергетического подхода к изучению природы износостойкости стали позволило установить, что критериями сопротивления стали абразивному изнашиванию являются твердость и энергоемкость изнашивания материала [896]. Суще-

ствуют экспериментальные данные, подтверждающие наличие удовлетворительной корреляции абразивной износостойкости с комплексом физико-механических свойств материалов [892].

Интенсивность абразивного изнашивания зависит от размера и твердости абразивных частиц, а также температуры, влажности и плотности абразивной среды [69, 142, 577, 776].

Для сравнения абразивного изнашивания различных материалов предложены следующие количественные критерии [577]:

а) объемный износ V_w;

б) износостойкость

$$\varepsilon = \frac{1}{\text{объемный износ}} = \frac{1}{V_w};$$

в) относительная износостойкость

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon(\text{образца})}{\varepsilon(\text{стандарта})}.$$

В качестве критериев износостойкости при абразивном изнашивании металлических материалов могут выступать кинетический показатель сопротивления деформирования, модуль пластичности, структура с определенным перечнем механических свойств и некоторые другие факторы.

Адгезионное изнашивание возникает вследствие действия межповерхностных сил, молекулярного взаимодействия на поверхности раздела, образования адгезионных связей между фрикционно взаимодействующими поверхностями [142, 577].

Проблема адгезионного взаимодействия является одной из центральных в науке о трении и изнашивании твердых тел.

Адгезионное изнашивание происходит в результате подповерхностного разрушения одного или обоих контактирующих материалов. В отличие от других видов изнашивания, для которых требуется определенное время на развитие или достижение критической разрушительной величины, адгезионное изнашивание возникает довольно быстро, приводя к тяжелым формам повреждения в виде задира или заедания движущихся частей в механических системах [577]. Сила адгезионного взаимодействия зависит от степени очистки поверхностей от адсорбированных слоев, загрязнений, смазочных веществ.

На площадках фактического контакта трущихся поверхностей под воздействием нормальных и тангенциальных усилий, темпера-

тур, деформационных процессов происходит разрушение всех экранирующих слоев (смазки, загрязнений, адсорбированных веществ, оксидов) и возникает контакт атомарных поверхностей. Механизм адгезии связан с особенностями электронного строения контактирующих тел, концентрацией валентных электронов, плотностью свободных электронов на поверхности раздела.

Энергия атомных связей, распределение атомов в поверхностных слоях, структура поверхности, дефекты кристаллической решетки определяют условия адгезионного взаимодействия. Эксперименты показали неоднозначную корреляцию адгезии с твердостью, модулем упругости, температурой плавления, кристаллической структурой, поверхностной энергией, скрытой теплотой плавления, размерами атомов [142, 297, 584].

Степень адгезионного взаимодействия в некоторых случаях зависит от поверхностной энергии твердых тел, т. е. работы, необходимой для создания новых поверхностей. Для приближенной оценки поверхностной энергии γ используется уравнение:

$$\gamma = \left(\frac{E}{y_0}\right)\left(\frac{a_0}{\pi}\right)^2, \qquad (1.15)$$

где E – модуль упругости; y_0 – расстояние между взаимодействующими поверхностями спайности; a_0 – радиус действия межатомных сил притяжения.

Сила адгезионного взаимодействия зависит от суммарной площади фактического контакта, на которой действуют поверхностные силы, от влияния упругих напряжений и деформаций на разрушение адгезионных связей при разделении контакта, от упругопластических контактных деформаций. Адгезия меньше у металлов с гексагональной кристаллической структурой и с плотной упаковкой атомов по сравнению с металлами с объемно центрированной и гранецентрированной кристаллическими решетками. Легирующие элементы (углерод, сера) уменьшают адгезионный износ [24, 113, 142].

Дж. Дж. Арчардом предложена теория адгезионного износа, согласно которой при контактировании неровностей и возникновении сильного адгезионного взаимодействия между ними последующее разрушение происходит как однократное действие по объему менее прочного материала трущейся пары. Таким образом, создаются частицы более мягкого материала, прилипшие к более твердому. Износ наблюдается, если эти частицы становятся свободными.

Согласно предложенной теории, основной параметр, определяющий износные характеристики, – твердость материала.

Для приближенной оценки объемного адгезионного износа V Дж. Дж. Арчардом предложено уравнение:

$$V = \frac{1}{3} k \frac{NS}{\sigma_s} \approx k \frac{NS}{H}, \qquad (1.16)$$

где k – коэффициент адгезионного износа; H – твердость более мягкого материала трущейся пары; S – путь трения скольжения.

Для приближенной оценки объема адгезионного износа V в условиях граничной смазки можно воспользоваться формулой Роу [142]:

$$V = k_{\text{гр}} \frac{(1+3f^2)^{1/2}}{H} \frac{N}{V_s} \frac{d_a S}{t_0} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \qquad (1.17)$$

где $k_{\text{гр}}$ – коэффициент износа; f – коэффициент трения; H – твердость более мягкого материала; V_s – скорость скольжения; d_a – диаметр (площади влияния) адсорбированной молекулы; t_0 – период колебания адсорбированной молекулы; Q – теплота адсорбции; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура.

Водородное изнашивание – один из специфических видов разрушения поверхностей трения, был установлен сравнительно недавно, примерно 25–30 лет тому назад, российскими трибологами Д. Н. Гаркуновым и А. А. Поляковым [68, 897].

Водородному изнашиванию подвергаются детали тяжелонагруженных подшипников качения, насосов для перекачки воды и топлива, металлополимерных узлов трения, элементы тормозных систем и др.

Из всех видов разрушения поверхностей при трении скольжения, по-видимому, водородное изнашивание наиболее трудно поддается изучению, несмотря на то, что оно обнаруживается в узлах трения машин разных отраслей техники и по широте проявления может быть сравнимо с абразивным изнашиванием. Процессы, происходящие при водородном изнашивании, находятся на стыке таких областей науки, как электрохимия, органическая химия, катализ, химия полимеров и смазочных материалов, механохимия, физикохимия и др. [66, 68].

Водородное изнашивание зависит от концентрации водорода в поверхностных слоях трущихся деталей. Он выделяется из материа-

лов пары трения или из окружающей среды (смазочного материала, топлива, воды и т. д.) и ускоряет изнашивание.

Водородное изнашивание обусловлено следующими процессами, происходящими в зоне фрикционного контакта тел:

- интенсивным выделением водорода при трении в результате трибодеструкции водородсодержащих материалов, создающей источник непрерывного поступления водорода в поверхностный слой стали или чугуна;
- адсорбцией водорода на поверхностях трения;
- диффузией водорода в деформируемый слой металла, скорость которой определяется градиентами температур и напряжений, что создает эффект накопления водорода в процессе трения;
- особым видом разрушения поверхности, связанного с одновременным развитием большого числа зародышей трещин по всей зоне деформирования. Характерным для разрушения является мгновенное образование мелкодисперсного порошка металлического материала [66, 68, 108, 856, 898].

Установлено, что при тяжелых режимах трения максимальная температура образуется не на поверхности детали, а на некоторой глубине. Это создает условия, при которых водород, если он будет адсорбирован на поверхности детали, под действием температурного градиента диффундирует вглубь поверхности, там концентрируется и вызывает охрупчивание поверхностных слоев, а, следовательно, усиливает изнашивание [66].

Большие градиенты напряжений и температур в приповерхностных слоях металла при трении способствуют повышенной концентрации водорода в зоне трения, образованию и развитию микротрещин, охрупчиванию материалов и интенсивному изнашиванию трибосистем.

Деформационное изнашивание заключается в изменении размеров или формы детали трения вследствие необратимой пластической деформации (смятия) ее микрообъемов.

Деформационное изнашивание является характерным видом повреждения шпоночных пазов и шпонок, шлицевых и зубчатых соединений, штифтов и упоров, резьбовых соединений, рельсов и колес железнодорожного подвижного состава, различного рода кулачков и толкателей, прессовых соединений и других деталей, часто работающих в условиях преимущественно ударного нагружения.

Основными причинами, вызывающими пластическую деформа-

цию, являются чрезмерные допускаемые напряжения или случайные значительные перегрузки.

Пластическое деформирование обычно сопровождает износ металлов и наблюдается в зоне, непосредственно прилегающей к поверхности трения. Характерными проявлениями этого вида изнашивания являются образование вмятин и углублений на рабочих поверхностях, местная деформация отдельных элементов трибосистем, выдавливание верхнего подшипникового слоя деталей. Постепенное развитие макродеформации под нагрузкой, чаще всего динамического характера, наблюдается у вкладышей и втулок, обычно изготавливаемых из цветных металлов, и проявляется в смещении металла за пределы поверхности соприкосновения с неподвижной контрдеталью в осевом направлении. Кроме того, пластическому деформированию поверхностей трения способствуют повышенные температуры и пластифицирующее действие смазки (эффект Ребиндера) [68]. В работе [65] приводится ссылка на исследования Б. Д. Грозина, установившего, что при контактировании двух поверхностей места фактического контакта подвергаются всестороннему объемно-напряженному сжатию; при этом даже хрупкие материалы, деформируясь, могут вести себя как пластичные тела.

Изнашивание при заедании – один из наиболее опасных видов разрушения поверхностей, возникающий в результате схватывания, глубинного вырывания материала, его переноса с одной поверхности трения на другую, разрушающего воздействия образовавшихся неровностей. Часто изнашивание при заедании считают предельным случаем адгезионного изнашивания.

Изнашивание при заедании имеет место в тяжелонагруженных зубчатых передачах, кулачковых механизмах, шарнирных соединениях, цилиндропоршневых парах, подшипниковых опорах, золотниковых устройствах, некоторых стационарных контактах при наличии вибраций.

Заедание проявляется в виде глубоких борозд, вырывов, наростов, рисок, оплавлений. Изнашивание при заедании может иметь лавинный, катастрофический характер и приводить к полному выходу узла трения из строя. Условия возникновения и кинетика развития изнашивания при заедании зависят от напряженно-деформированного состояния контакта, кинематики движения (качение, скольжение, качение со скольжением), температурного состояния, физико-механических и химических свойств контактирующих тел,

характеристик смазочных материалов, окружающей среды, количества и качества присадок к основному маслу, способа смазки, шероховатости контактирующих поверхностей, других факторов. Обязательным условием возникновения заедания является разрушение промежуточных смазочных слоев и взаимодействие физически чистых (ювенильных) контактирующих поверхностей. Заедание может возникнуть в результате срабатывания смазочного материала и при недостаточном его поступлении к местам трения [50, 142, 455, 899].

В случае невысоких контактных температур, деформационного упрочнения узлов схватывания и повышенной их прочности (по сравнению с прочностью исходного материала) разрушение поверхности происходит в менее прочном материале. Возникают задир и повышенный износ. Увеличение температуры контактирующих поверхностей приводит к размягчению материала, частичному удалению поверхностных пленок, росту фактической площади контакта, к повышению склонности поверхностей к схватыванию. Принципиальное значение при этом имеет скорость процесса разрушения и образования защитных поверхностных слоев. Сближение атомов контактирующих материалов на расстояние межатомных взаимодействий, электронный обмен приводят к образованию узлов схватывания, возникновению прочных химических связей. Механические свойства узлов схватывания (мостиков сварки) зависят от процессов рекристаллизации, диффузии, релаксации напряжений. Рекристаллизация приводит к образованию общих зерен в местах контакта, диффузионные процессы сопровождают упрочнение, разупрочнение, охрупчивание материалов. Пластическая деформация, предшествующая заеданию, активирует поверхности трения, при этом возникают неравновесное электронное состояние, активированное состояние атомов поверхностей. Указанные факторы способствуют образованию узлов схватывания и развитию изнашивания в условиях заедания.

В момент возникновения заедания, как правило, резко увеличивается коэффициент трения скольжения (для тихоходных и среднескоростных трибосопряжений), растет температура, в механизмах развиваются динамические процессы, повышается виброакустическая активность. В случае высоких скоростей, мощных контактных тепловых источников возникают интенсивная пластическая деформация поверхностных слоев и их оплавление. Катастрофически быстрое изнашивание трущихся тел протекает без заметного увеличения или при уменьшенном коэффициенте трения скольжения, который соответствует контактно-гидродинамическому режиму смазки

[50, 142].

В случае изнашивания поверхностей в режиме заедания при качении со скольжением тел, отстающие поверхности подвержены большему износу, чем опережающие. В режиме заедания интенсивность изнашивания на несколько порядков увеличивается по сравнению с изнашиванием до возникновения заедания [142].

С учетом физической сущности схватывания двух металлических тел и трехстадийной модели этого процесса, предложенной Н. А. Буше с сотрудниками, в работе [900] предложена гипотеза, в соответствии с которой условием схватывания является равенство скорости вязкопластического течения тонкого поверхностного слоя металла и скорости скольжения вала.

Показано [901], что схватывание с заеданием является необратимым процессом и возникает в том случае, когда размер частиц, образовавшихся при износе, больше диаметрального зазора, имеющегося в замкнутой трибосистеме.

Методы прогнозирования условий возникновения заедания на этапе проектирования узлов трения базируются на следующих критериях [142].

Критерий Г. Блока основывается на гипотезе о существовании критической температуры разрушения смазочного слоя, характерной для каждой комбинации материалов и масла. Температура в контакте рассчитывается как сумма объемной (поверхностной) температуры тел перед входом в контакт θ_0 и мгновенного повышения температуры в контакте, возникающей в процессе трения тел, – температурной вспышки. Температура θ_0 определяется экспериментально или рассчитывается на основе рассмотрения теплового баланса узла трения. Температурную вспышку для катящихся со скольжением цилиндрических тел находят по формуле:

$$\vartheta = \frac{0{,}83 f N_{\text{П}} (v_1 - v_2)}{\left(\sqrt{\lambda_1 \rho_1 c_1 v_1} + \sqrt{\lambda_2 \rho_2 c_2 v_2}\right)\sqrt{b}}, \qquad (1.18)$$

где f – коэффициент трения скольжения; $N_{\text{П}}$ – погонная (удельная) нагрузка; v_1, v_2 – скорости качения поверхностей; λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности материалов поверхностей; ρ_1, ρ_2 – плотности материалов поверхностей; c_1, c_2 — удельные теплоемкости материалов поверхностей; b – полуширина площадки контакта, рассчитанной по Герцу.

Условие отсутствия возникновения заедания по Г. Блоку:

$$\theta_0 + \frac{0{,}83 f N_{\text{П}} (v_1 - v_2)}{\left(\sqrt{\lambda_1 \rho_1 c_1 v_1} + \sqrt{\lambda_2 \rho_2 c_2 v_2}\right)\sqrt{b}} < \theta_{\varepsilon\,\text{кр}}, \qquad (1.19)$$

где $\theta_{\varepsilon\,\text{кр}}$ – суммарная критическая температура, при которой происходит заедание поверхностей. На основе анализа экспериментально-расчетных данных для различных условий трения, материалов, смазочных сред $\theta_{\varepsilon\,\text{кр}}$ = 373–623 К [142].

Механотермовременной критерий заедания, полученный Ю. Н. Дроздовым на основе термофлуктуационного уравнения прочности Журкова, имеет вид:

$$\frac{\sigma}{\sigma_{\text{т}}} + \frac{\alpha T E \ln \dfrac{\tau}{\tau_0}}{3\chi\sigma_{\text{т}}} \le k_{\text{кр}}, \qquad (1.20)$$

где σ – нормальное контактное напряжение; $\sigma_{\text{т}}$ – предел текучести приповерхностных слоев менее прочного материала; χ – коэффициент механической перегрузки; α – коэффициент теплового расширения; T – абсолютная температура; E – модуль упругости; τ – время протекания процесса трения в контакте; τ_0 – период колебания атомов; $k_{\text{кр}}$ – критическое (безразмерное) значение критерия заедания.

Изнашивание расслаиванием – процесс изнашивания, при котором зарождение и рост подповерхностных трещин приводит к образованию пластинчатых частиц износа.

Теория изнашивания посредством расслаивания (отслаивания), предложенная Н. П. Су [902], в значительной степени способствовала развитию концепции усталостного изнашивания.

Теория отслаивания основывается на следующих основных положениях. В процессе трения зона основных пластических деформаций не ограничивается областью неровностей, например, как это принималось в адгезионной теории Дж. Дж. Арчарда, а простирается далеко вглубь материала. При этом виде изнашивания тангенциальное усилие передается между поверхностями адгезионным и пропахивающим действием. Твердые неровности, проникая в мягкую поверхность, вызывают пропахивание и подповерхностную пластическую деформацию. Подповерхностная пластическая деформация накапливается при многократных проходах неровностей, при этом образуются трещины и пустоты в подповерхностных слоях ма-

териала, происходит их рост и слияние. При достижении критических размеров происходит образование частиц износа в результате среза материала между поверхностью и трещиной. Процесс отслаивания рассматривается как кумулятивный. Под действием каждой проходящей неровности происходит некоторый сдвиг материала. Лепестки износа возникают после прохождения достаточно большого числа неровностей. В этом случае величина износа может быть определена по формуле:

$$W = \frac{B_1 h_1}{d_{c1} HB} NS + \frac{B_2 h_2}{d_{c2} HB} NS = KNS, \qquad (1.21)$$

где HB – твердость более мягкого материала; d_{c1}, d_{c2} – критическое пластическое смещение лепестка до его отслаивания; B_1, B_2 – константы пропорциональности; h_1, h_2 – толщина лепестков; d_{c1}, d_{c2} – определяются вязкостью материала, и, учитывая, что повышение твердости часто сопровождается уменьшением вязкости материала, можно предположить взаимно компенсирующее влияние этих параметров; K – коэффициент износа.

По мнению автора теории, образование чешуйчатых частиц износа происходит в результате следующей последовательности событий:

1) зарождение подповерхностных дислокаций;
2) накопление дислокаций;
3) образование полостей;
4) слияние полостей, приводящее к образованию трещин, параллельных поверхности;
5) образование чешуйчатых частиц, когда трещина достигает некоторой критической длины.

Теория износа расслаиванием применима для объяснения ряда фрикционных явлений, например, зависимости скорости износа при фреттинге от амплитуды смещения, а также позволяет по-новому рассмотреть эксперименты по трению материалов с пластичными покрытиями на их рабочих поверхностях [903].

Изнашивание при фреттинг-коррозии возникает при малых колебательных, циклических, возвратно-поступательных перемещениях с малыми амплитудами. Необходимым условием возникновения фреттинг-коррозии является наличие проскальзывания между соприкасающимися поверхностями.

Фреттинг-коррозия возникает в заклепочных, болтовых, шлице-

вых, шпоночных, штифтовых соединениях, прессовых посадках деталей, стальных канатах, шарнирах, соединениях муфт, рессорах, клапанах, регуляторах электрических контактов, кулачковых механизмах, несущих системах вертолетов и самолетов, деталях газотурбинных двигателей.

Разрушение заключается в образовании на соприкасающихся поверхностях мелких язв и продуктов коррозии в виде налета, пятен и порошка. Фреттинг-коррозия может происходить также в вакууме, в среде кислорода, азота и гелия [68, 135].

Процесс изнашивания в значительной степени активизируется наличием вибраций, переменных во времени крутящих и изгибающих моментов. Повреждения концентрируются на небольших участках и по внешнему виду напоминают точечную коррозию. Фреттинг-коррозия находит свое выражение в увеличении шероховатости поверхностей, образовании натиров, каверн, микротрещин и снижении усталостной прочности материалов деталей. Если порошкообразные продукты изнашивания, обычно представляющие собой оксиды, имеют возможность выхода из зоны контакта, то они могут вызывать ослабление натяга, плотности соединений, увеличение вибраций, а при попадании в другие трущиеся узлы — вызывать их интенсивное изнашивание. Если частицы износа не имеют выхода из зоны контакта, то в системе возникает повышенное расклинивающее действие. В результате возможны заедания, заклинивание механизмов и даже аварийные ситуации.

В зависимости от условий нагружения, кинематики контакта, свойств контактирующих материалов, коррозионной активности окружающей среды и некоторых других факторов может изменяться доминирующий механизм поверхностного разрушения. Вначале разрушаются оксидные пленки, отслаиваются тонкие чешуйки металла, усиливается адгезионное взаимодействие поверхностей. Происходит адгезионно-усталостное изнашивание при одновременном коррозионном воздействии среды. Стадийность фреттинг-коррозии включает упрочнение микровыступов взаимодействующих поверхностей в местах фактического контакта. Разрушение оксидных слоев, межатомное взаимодействие физически чистых поверхностей приводят к микросхватыванию. Продукты износа образуются вследствие разрушения узлов схватывания и усталостного повреждения микронеровностей. Одновременно в подповерхностных слоях накапливаются усталостные повреждения, усиливаются коррозионные процессы, формируется коррозионно-активная среда. В заключительной ста-

дии фреттинг-коррозии преобладают коррозионно-усталостные разрушения, приводящие к ускоренному изнашиванию. Фреттинг-коррозия, в основном, является механическим явлением, которое по мере развития сопровождается различными химическими процессами [72, 142, 530, 904].

С ростом удельной контактной нагрузки может изменяться характер повреждения материала от усталостно-коррозионного до возникновения схватывания и взаимного переноса материалов. С ростом числа циклов нагружения объем удаленного материала увеличивается. Повышение амплитуды проскальзывания вызывает усиленное изнашивание, особенно в области амплитуд, превышающих 0,10–0,15 мм. При малых амплитудах частицы износа (оксиды) могут играть роль тел качения и предохранять от повышенного изнашивания, при больших амплитудах — возможно возникновение очагов схватывания. Частота колебаний изменяет скорость проскальзывания в контакте, период цикла и контактную температуру. Большее разрушение поверхности характерно для низких частот колебаний. Коррозионная активность окружающей среды существенно влияет на интенсивность изнашивания. Повышенное значение температур в местах фактического контакта шероховатостей, механическая активация материалов приводят к процессу схватывания. Однако влияние температуры вследствие изменения скорости образования оксидных пленок на износ неоднозначно [142].

Расчетные зависимости для определения износа материалов в условиях фреттинг-коррозии имеют весьма приближенный, оценочный характер.

Кавитационное изнашивание – одна из разновидностей механического изнашивания, возникающая при относительном движении твердого тела и жидкости в условиях кавитации [68, 905].

Явление кавитации было предсказано Л. Эйлером в 1754 г. в его теории гидравлических турбин и впервые было обнаружено экспериментально в 1895 г. в связи с изучением повреждений ходовых винтов кораблей [584].

Кавитационный износ типичен для деталей машин, работающих в жидких средах: смазываемых подшипниковых узлов, насосов, гидротурбин, гребных винтов и др.

Процесс образования гидродинамической кавитации связан с возникновением каверн – кавитационных пузырьков. В работе [577] приводятся данные о том, что кавитационный пузырек может вырасти за 0,002 с до 6 мм в диаметре и полностью разрушиться за 0,001 с.

При определенных типах кавитации на площади в 1 см^2 в течение 1 с могут образоваться и разрушиться до 30 млн. кавитационных пузырьков. Предпосылки для наступления и протекания кавитации следующие. При замыкании до полного исчезновения парогазовых пузырей у поверхности детали последняя подвергается микроскопическим гидравлическим ударам. Из нескольких миллионов образовавшихся кавитационных пузырьков примерно один из 30 тыс. участвует в разрушении. Под действием ударов поверхность металла начинает деформироваться и подвергаться наклепу; появляются линии сдвига и происходит как бы своеобразное травление с выявлением границ отдельных зерен. Многократно повторяющиеся удары вызывают разупрочнение и перенаклеп материала на отдельных микроучастках, сопровождающиеся возникновением очагов разрушения в виде трещин. Разрушается прежде всего менее прочная структурная составляющая (в сталях – феррит, в чугунах – графитовые включения). Затем может последовать выкрашивание и более прочных составляющих. Разрушение развивается в пределах зерен или по их границам в зависимости от соотношения прочности зерен и связи между ними.

Основные действующие факторы при кавитации имеют различную природу – значительные локальные механические силы, химические, тепловые, электрические и другие процессы. Механизм и кинетика кавитационного изнашивания имеют стадийный характер, включающий в себя процесс зарождения и роста кавитационных каверн, их захлопывание (схлопывание), разрушительное воздействие на поверхности трения. Кавитационный износ (кавитационная эрозия) металлических тел имеет вид выдавленных кратеров, периодически образующихся в процессе работы деталей [31, 75, 142, 566, 905, 906].

Интенсивность кавитационного изнашивания зависит от условий зарождения и увеличения кавитационных каверн, процесса захлопывания каверн и мощности кавитационных ударов, от свойств поверхностных слоев материалов, от кинематических и динамических параметров потока жидкости. Значительное влияние на кавитационный износ оказывают скорость потока жидкости и вибрация контактирующих с жидкостью деталей.

Коррозионно-механическое изнашивание – изнашивание в результате механического воздействия, сопровождаемого химическим и/или электрохимическим взаимодействием материала с окружающей средой. Поверхностное разрушение материалов в этом случае

происходит в результате воздействия механического и коррозионного факторов.

Коррозионно-механическому изнашиванию подвержены детали цилиндропоршневой группы и подшипники скольжения двигателей внутреннего сгорания, центробежные насосы, рабочие органы машин по переработке сырья, содержащего жирные кислоты, детали оборудования в торфодобывающей и угольной отраслей промышленности и т. п.

Например, сжигание в цилиндрах дизелей топлива с повышенным содержанием серы увеличивает интенсивность изнашивания поршневых колец и цилиндровых втулок в 3–4 раза и более [68].

Считается, что коррозионно-механическое изнашивание не может рассматриваться как простое суммирование механического и электрохимического факторов. Оно представляет собой сложный процесс, в котором электрохимическое растворение служит своеобразным катализатором усталостного разрушения. Трение же, в свою очередь, активизирует протекание электрохимической коррозии. Во всех этих процессах существенную роль играет электродный потенциал трибосистемы [907]. Механизм коррозионно-механического изнашивания может быть представлен двумя определяющими и взаимосвязанными процессами: коррозией свежеобразованных поверхностей и усталостным разрушением в результате передеформирования в местах фактического контакта [908].

Интенсивность коррозионно-механического изнашивания определяется природой контактирующих материалов, их способностью противостоять коррозии, составом окружающей среды, видом взаимодействия материалов с окружающей средой, типом используемых смазочных материалов и рядом некоторых других факторов [72, 905].

Окислительное изнашивание довольно часто относят к одной из разновидностей коррозионно-механического изнашивания. Вместе с тем, проведены серьезные фундаментальные исследования, подтверждающие индивидуальность и целый ряд отличительных особенностей этого вида изнашивания материалов [30, 38, 909].

От других видов коррозионно-механического изнашивания окислительное отличается отсутствием коррозионно-активной среды, протекает при нормальных и повышенных температурах при трении без смазочного материала или при недостаточном его количестве. Интенсивность изнашивания может быть достаточно большой, но поверхности трения сохраняют при этом малую шероховатость.

Окислительному изнашиванию подвергаются детали шарнирно-

болтовых соединений, металлические колеса фрикционных передач, элементы крепления выхлопных коллекторов двигателей внутреннего сгорания, некоторые детали узлов трения качения.

Интенсивность окислительного изнашивания зависит от толщины, адгезии к подложке и прочности оксидной пленки, а также в значительной степени от температуры, контактного давления и временного фактора. Трение, как известно, сопровождается активизацией поверхностных слоев материалов, которая, в свою очередь, способствует более интенсивному протеканию целого ряда физико-химических процессов: адсорбции, окисления, диффузии, пассивации и др. В зависимости от условий фрикционного взаимодействия и состава окружающей среды, например, на железе могут образовываться пленки FeO, Fe_2O_3, Fe_3O_4. Образование и разрушение вторичных структур сопровождается деформированием и активацией поверхностных слоев. В широком смысле под вторичными структурами следует понимать пленки различного состава, строения и свойств, разделяющие ювенильные поверхности материалов (металлов) при их контактировании [909, 910].

Механизм и интенсивность изнашивания материалов зависят от соотношения скоростей поверхностного разрушения ($V_{разр}$) и образования-восстановления ($V_{ок}$) оксидных пленок. Одно из условий, обеспечивающих существование окислительного изнашивания, имеет вид

$$V_{ок} > V_{разр}. \qquad (1.22)$$

Выполнение (1.22), очевидно, может быть осуществлено двумя путями: уменьшением скорости процесса, обусловливающего повреждаемость, и увеличением скорости процесса окисления. При высоких скоростях разрушения оксидных слоев образуются физически чистые (ювенильные) поверхности, имеющие повышенную склонность к схватыванию и быстрому разрушению.

Вместе с тем, при окислительном изнашивании [38] необходимо стремиться к выполнению условия

$$V_{ок} \Rightarrow \min. \qquad (1.23)$$

Существует два принципиально различных процесса разрушения поверхностных вторичных структур: в процессе формирования пластичных перемещающихся поверхностных пленок твердых растворов и при многократном нагружении хрупких вторичных структур,

представляющих собой химические соединения.

Процесс окислительного изнашивания, происходящий в поверхностных слоях толщиной порядка сотен ангстрем, условно может быть разделен на три этапа:

1. Деформирование и активизация. Работа связей вызывает особый вид пластического деформирования – текстурирование. При этом плотность дислокаций и концентрация вакансий достигают значений, близких к насыщению. Термодинамически неустойчивое состояние металла в процессе текстурирования вызывает его резкую активизацию.

2. Образование вторичных структур. Материальный контакт активизированного слоя и имеющихся в зоне трения агрессивных компонентов среды приводит к их физико-химическому взаимодействию – образованию вторичных структур.

3. Разрушение вторичных структур. В результате многократного нагружения и внутренних напряжений в пленке вторичных структур происходит образование и развитие микротрещин, а на поверхности раздела – ослабление связей и отслаивание пленки, которое происходит в результате несоответствия дислокационных систем пленки и металла. Последующие механические воздействия приводят к разрушению и уносу пленки. Далее, на обнаженных (ювенильных) участках процесс повторяется.

Периодичность процессов деформации, образования вторичных пленок и их разрушения вполне закономерна для окислительного трения и изнашивания [38].

Высокая активность вновь образованной поверхности при срезе частиц материала обусловливает протекание физической адсорбции и хемосорбции, образование химических соединений. Работами Н. Сода и Т. Сасада показана роль времени процесса существования срезанного участка и хемосорбции кислорода с атомами металла. Среднее свободное время между образованием мостиков сварки можно оценить по формуле:

$$t = \frac{\pi a_{\text{м}} H}{4} \frac{1}{p v_s}, \qquad (1.24)$$

где $a_{\text{м}}$ – радиус круга мостика сварки; H – твердость более мягкого материала; p – среднее контактное давление; v_s – скорость скольжения.

Установлена связь интенсивности изнашивания и времени для

образования на поверхности металлов хемосорбированных молекул газа. Время пребывания молекулы в адсорбционном центре оценивается по формуле Я. И. Френкеля:

$$t_{ад} = t_0 \exp \frac{Q}{RT}, \qquad (1.25)$$

где t_0 – период колебаний адсорбированной молекулы в нормальном к поверхности направлении; Q – теплота адсорбции; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура поверхности.

В некоторых случаях, например, при длительном неподвижном контакте сопряженных деталей в окислительной среде может произойти схватывание поверхностей вследствие сращивания окисных пленок в зазорах [68].

Усталостное изнашивание является результатом повторного многократного деформирования микрообъемов материала, вызывающего возникновение усталостных трещин и отделение частиц материала.

Усталостное изнашивание наиболее характерно для подшипников качения и скольжения, деталей тормозных систем и топливной аппаратуры д. в. с, цапф валов и ряда других деталей машин.

Циклически изменяющиеся контактные напряжения вызывают поверхностное разрушение в виде ямок выкрашивания (питтинг), трещин, осповидного изнашивания, отслаивания. Усталостные трещины, возникая на поверхности трения, распространяются вглубь слоя. Постепенно удлиняясь, мелкие трещины образуют сетку на отдельных ограниченных или больших участках поверхности. Раскрытие трещин может инициировать пульсирующее давление масла в трибосистеме, а также поверхностно-активные компоненты смазочной среды. Трещина, достигнув основания антифрикционного слоя, изменяет свое направление, распространяясь по стыку между слоем и основанием, в результате отдельные участки поверхностного слоя обособляются, а затем выкрашиваются [68, 113].

Количественно контактная усталость может быть выражена числом циклов нагружения или в часах работы до возникновения усталостных повреждений поверхностей.

Появление усталостного изнашивания (выкрашивания) выражается в усилении вибрационно-акустической активности механизмов, повышении уровня шума, увеличении концентрации нагрузки, кон-

тактных напряжений, уменьшении размера площади несущей поверхности, возникновении интенсивного износа и заедания. Возникновение и развитие усталостного изнашивания зависят от напряженного и деформированного состояния поверхностных и приповерхностных слоев материалов, физико-химических свойств смазочных материалов и окружающей среды, толщины смазочного слоя, кинематики контакта, формы и размеров соприкасающихся деталей [24, 68, 69, 113, 191].

Возникновению микротрещин при циклических контактных воздействиях способствует влияние концентраторов напряжений. К поверхностным концентраторам напряжений относятся дефекты в виде царапин, вмятин, рисок, прижогов и др. Подповерхностными концентраторами напряжений являются неметаллические включения, микропоры, раковины, карбиды и др. [113, 507].

Скорость развития усталостного изнашивания зависит от многих факторов: механических свойств материала, физико-механических свойств поверхности, качества обработки поверхности, остаточных напряжений в приповерхностных и поверхностных слоях материалов, от концентрации напряжений, степени приработки, частоты изменения напряжений, уровня температуры, химической активности окружающей среды и др. Увеличение коэффициента трения скольжения способствует возникновению выкрашивания. В начальный период работы сопряжений может возникнуть ограниченное выкрашивание, зависящее от концентрации нагрузки на отдельных участках или неровностях. В результате последующей приработки распределение нагрузки становится более равномерным и выкрашивание прекращается [24, 113, 142].

Установлена связь интенсивности стационарного усталостного изнашивания стали с деформационно-гистерезисным рассеянием энергии при трении и термодинамическими свойствами конструкционного материала, а также фрикционной усталостью и прочностью твердых тел [911]. Отмечается, что усталостное изнашивание при трении подчиняется общим закономерностям усталостного разрушения материалов [912]. На графиках зависимости долговечности (числа циклов) от уровня контактных напряжений (y, N) или ($\lg y$, $\lg N$) часто бывает точка перехода в прямую, параллельную оси N. Принимается, что при соответствующем этой точке уровне контактных напряжений материал может выдержать неограниченное количество циклов нагружения без разрушения. Количество циклов нагружения, соответствующего точке перегиба N_0 – базовому числу циклов на-

гружения, зависит от твердости материала:

$$N_0 \approx kHB^3, \tag{1.26}$$

где k – коэффициент; HB – твердость материала поверхности по Бринелю [142].

Фрикционно-усталостная модель изнашивания была развита И. В. Крагельским и учитывала влияние процессов, протекающих на уровне микрогеометрии (шероховатостей) поверхностей. При относительном перемещении (скольжении) трущихся тел разрушение происходит в результате многократного деформирования истираемого материала жесткими микронеровностями контртела.

Уравнение И. В. Крагельского для фрикционной усталости имеет вид:

$$I_h = \sqrt{\frac{h}{R}} \frac{p_a}{p_r} \frac{k_1 \alpha^*}{n}, \tag{1.27}$$

где h/R – относительная глубина внедрения (h – глубина внедрения единичной неровности; R – радиус неровности); p_a и p_r – соответственно, номинальное и фактическое давления; k_1 – коэффициент, зависящий от расположения неровностей по высоте; α^* – отношение номинальной площади к площади трения; n – число циклов, которое выдерживает деформированный объем до разрушения.

При фрикционном взаимодействии тел процесс накопления повреждений имеет определенную стадийность (цикличность) [110, 114, 131]. Вначале происходит накопление упругих искажений решетки и увеличивается плотность дислокаций. После достижения критической плотности дислокаций возникают субмикроскопические трещины. Вместе с необратимыми искажениями кристаллической решетки нарушаются межатомные связи и разрушаются отдельные микрообъемы.

Эрозионное изнашивание – один из видов механического изнашивания в результате воздействия на материалы потока жидкости и/или газа, а также твердых частиц.

Эрозионное изнашивание наиболее характерно для деталей и узлов сельскохозяйственных и горных машин, различных видов транспортной техники, рабочих органов ряда обрабатывающих и перерабатывающих различные виды сырья механизмов, деталей ци-

линдропоршневой группы двигателей внутреннего сгорания и др.

В результате удаления поверхностных локальных микрообъемов и повторного воздействия частиц заметно увеличивается шероховатость поверхности. Интенсивность эрозионного разрушения зависит от свойств материала основы, типа используемых наполнителей, величины адгезионных связей на границе матрица-наполнитель. Энергия, выделяющаяся в момент соударения частиц с поверхностью, может вызвать локальное оплавление мест контакта. Интенсивность эрозионного изнашивания зависит от скорости потока (частиц), физико-механических свойств частиц, поверхностных и приповерхностных слоев материала, физико-химических свойств и состава среды и ряда других факторов [142, 913].

Принято различать эрозионное разрушение при гидроабразивном и газоабразивном воздействии среды.

При гидроабразивном изнашивании механическое воздействие твердых частиц может сочетаться с коррозионным и кавитационным разрушением материалов. Во времени абразивный износ развивается приблизительно по линейному закону, кавитационный – по существенно нелинейной зависимости.

Зависимость газоабразивного износа материала от относительной твердости абразива имеет S-образный вид: нижняя часть относится к соотношению твердости абразива $H_а$ к твердости материала $H_м$, т. е. $H_а/H_м \le 0{,}7$, верхняя область начинается при $H_а/H_м \ge 1{,}6-1{,}8$. Изнашивание материалов зависит от вида и величины подводимой твердыми частицами энергии и имеет абразивно-усталостную природу.

Эрозионный вид изнашивания может также возникать в ряде соединений и устройств при прохождении через них электрического тока.

Следует отметить, что рассмотренный выше перечень видов изнашивания, без сомнения, может быть существенно дополнен. Например, широко известны работы, в которых рассматриваются изнашивание посредством диспергирования (измельчения) отдельных участков поверхностей трения, скатывания фрагментов поверхностного слоя, выкрашивания вновь образуемых структур и др. [68, 103, 297]. Следует отметить большие перспективы электронной теории изнашивания и релаксационно-диффузионной модели фрикционного взаимодействия твердых тел при трении [144, 914].

Можно быть уверенным в том, что, в соответствии с общими диалектическими принципами развития науки, уже в обозримом будущем – начале XXI века будут предприняты попытки создания универсальных теорий изнашивания материалов. Базой для проведения таких работ являются фундаментальные результаты, полученные при исследовании процессов трения и изнашивания твердых тел, например, [30, 33, 34, 38, 69, 113, 915 и др.].

Сложность изучения изнашивания состоит в том, что в реальных трибомеханических системах различные механизмы изнашивания действуют, как правило, одновременно. Практически труд исследователей заключается в определении, выделении и изучении основного вида изнашивания узла трения. Зачастую это происходит при довольно значительном фоне, обусловливающем большую дисперсию измеряемых трибологических параметров.

Еще одна особенность, приводящая к значительным трудностям в изучении термоконтактных задач, непосредственно связанных с изнашиванием и дилатацией трибосистем, заключается в существовании явления, называемого термоупругой неустойчивостью контакта [916].

Дальнейшему прогрессу в изучении процессов изнашивания материалов будут способствовать оригинальные методические решения, а также использование современных данных об атомном и электронном строении триботехнических материалов [136, 850, 914].

ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТРИБОДИЛАТОМЕТРИИ

Вопросы методологии исследований триботехнических свойств материалов являются одними из наиболее важных в общей проблеме повышения надежности и улучшения служебных свойств самых разнообразных машин, механизмов и отдельных механических устройств. К числу одних из наиболее сложных с технической и методической точек зрения вопросов относится испытание на изнашивание так называемых прецизионных пар, т. е. таких узлов, линейный износ которых соизмерим с размером шероховатостей контактирующих поверхностей. Следует отметить, что измерение линейного износа прецизионных пар трения представляет собой достаточно сложную задачу, что связано, по крайней мере, с двумя причинами. Во-первых, абсолютные значения теплового расширения и износа трибосопряжений, являясь достаточно малыми величинами, могут иногда отличаться друг от друга на один–два порядка. Во-вторых, объективная оценка износа таких узлов существенно затруднена, а иногда и практически невозможна из-за негативного влияния на процесс измерений радиальных биений элементов трибосистем и их деформации в процессе испытаний. Так, например, допуск на величину радиального биения сопрягаемых деталей (размером от 30 до 50 мм), изготавливаемых с использованием операций чистового шлифования, составляет от 12 до 20 мкм [917]; ГОСТ 23.204-78 допускает при проведении износных испытаний материалов величину радиальных биений образующей ролика, равную 10 мкм. Очевидно, что оценка изнашивания и дилатации трибосистем с микронной точностью при величинах радиального биения трущихся элементов в несколько десятков микрометров представляется, по существу, нереальной задачей.

Прецизионный характер измерений выдвигает повышенные требования ко всему процессу трибологических испытаний: используемым методикам оценки фрикционных параметров, включая оборудование, микро- и макрогеометрическим характеристикам образцов, статистической обработке получаемых результатов и др. Разработка методологических основ трибодилатометрии предполагает решение, по крайней мере, нескольких важных задач. К их числу относятся: разработка основ теории и терминологии развиваемого направ-

ления; разработка методик исследования изнашивания и дилатации трибосистем; оценка факторов, влияющих на точность и воспроизводимость результатов измерений и статистическая обработка результатов экспериментов.

2.1. Основы теории и терминология

[933, 936, 949]

Практически одновременно с определением **трибологии** как науки трибологические термины и определения, как общего, так и частного характера, становятся постоянными объектами внимания ученых большинства развитых стран мира.

Для трибологии характерно использование одних и тех же терминов в различных значениях, необоснованное и зачастую некорректное использование терминов, распространенных в смежных областях, отсутствие преемственности и взаимной согласованности с этими областями.

Стандартизированные термины и определения должны представлять собой систему взаимосвязанных понятий и классификаций, наиболее важных в исследуемой области. При этом необходимо обеспечить максимальную связь с системой понятий и терминологией смежных наук, поскольку система стандартных понятий должна не только иметь научно-познавательное (в том числе и общеинженерное) значение и стимулировать развитие данной области знаний, но и учитывать сложившуюся в трибологии и триботехнике научную и техническую терминологию.

Известно, что научная и техническая информация характеризуется точностью, наличием строго определенного смысла, не допускающего разночтения. Поэтому лучше всего, когда язык этой информации лишен эмоциональной определенности, которая всегда индивидуальна, субъективно личностна. Существует тесная связь современной научной лексики с латынью и греческим языком.

Перефразируя известное выражение, можно сказать: *«Invia est scientia via sine lingua Latine* – нет пути в науке без латинского языка». В 20-м столетии научная и производственно-техническая информация стала широко использовать английский язык, в частности, потому, что словарный запас этого языка как и латынь эмоционально нагружен лишь на 15–20 % от всего объема. Как правило, вновь образующиеся термины имеют латинскую и греческую основу.

Проведенные к настоящему времени исследования позволили раз-

работать методологические принципы контроля изнашивания машиностроительных материалов путем измерения размеров элементов трибосистемы. Вместе с тем, дальнейший прогресс в развитии этого перспективного направления в трибологии в значительной степени тормозится, например, из-за отсутствия стандартизированной терминологии (и как следствие – серьезных недоразумений в общении и ошибок в передаче информации), четкого определения самого направления исследований, его предмета, используемых измерительных устройств и т. д.

В процессе испытаний модельных, а также эксплуатации натурных трибосопряжений машин и механизмов, они практически постоянно изменяют свои размеры вследствие теплового расширения и изнашивания, являющихся следствием проявления природы самого феномена трения. Тепловое расширение – дилатация приводит к увеличению размеров трибосистем. В ряде случаев, например, в подшипниках скольжения, работающих в режиме гидродинамической смазки, величина дилатации является одним из наиболее важных условий, определяющих как саму возможность, так и оптимальные параметры эксплуатации трибосопряжений. Изнашивание уменьшает размеры трибосистем, предельная величина износа которых определяет период эксплуатации (ресурс) самых разнообразных технических устройств и конструкций. Наиболее значительные изменения дилатации и изнашивания имеют место в начальном периоде работы сопряжений, в течение которого происходит их приработка, включающая стабилизацию характеристик геометрии поверхностей, физико-химических свойств, силы и температуры трения, а также интенсивности изнашивания.

Как следует из вышеизложенного, изнашивание и дилатация в любой заданный момент времени могут быть достаточно точно определены на основе данных о температурном режиме работы и величине износа элементов трибосистемы. На зависимости износ–дилатация от времени испытаний (работы) можно отметить места (рис. 2.1, точки 0–3), позволяющие совершенно однозначно охарактеризовать состояние материалов, использованных для изготовления трибосопряжений. Принципиальное различие между этими состояниями заключается в величине того вклада, который дилатация и изнашивание вносят в абсолютное значение изменения линейного размера трибосистемы (рис. 2.2). Так, в т. 1 (рис. 2.2 б) линейный размер системы с некоторым начальным размером l_0 (условно показан утолщенной линией, совпадающей с осью времени испытаний) характе-

ризуется износом l_{w1} и тепловым расширением l_{TE}. При этом тепловое расширение к моменту времени t_1 приобретает некоторое постоянное значение, величина которого определяется конкретными условиями испытаний узлов трения. Эта величина теплового расширения при неизменных условиях испытаний является постоянной составляющей общего линейного размера дилатации трибосистемы и после завершения испытаний.

Линейный размер узла трения будет полностью определяться только износом после его охлаждения до исходной (до начала испытаний) температуры (рис. 2.2 г). В этом случае абсолютный износ будет состоять из начального (приработочного) износа – l_{w1} и износа l_{w2}, полученного в результате испытаний в условиях квазистационарного теплового состояния в течение времени t_2–t_1. Использование информации о составляющих линейного размера трибосистемы позволяет определить ее тепловое расширение, а также значение износа в приработочный период и в период установившегося изнашивания.

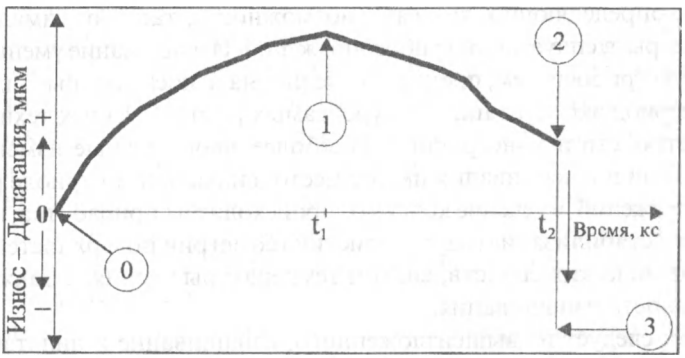


Рис. 2.1. Термоизносная характеристика трибосистемы (ТС): *0* – начало испытаний; *1* – стабилизация теплового состояния ТС; *2, 3* – процесс испытаний, состояния ТС после завершения испытаний и охлаждения до начальной (т. 0) температуры, соответственно.

Таким образом, по отношению к износу и дилатации узлов трения возможны три подхода к представлению результатов испытаний. Первый – предусматривает использование данных об износе материалов, полученных прямым (например, измерением линейного размера деталей) или косвенным (например, путем пересчета потери массы деталями на линейный износ) способами. Измерения в этом случае осуществляются без учета дилатации системы вследствие ее

фрикционного нагрева, например, после охлаждения до заданной (комнатной) температуры. Такая характеристика в полном смысле может быть названа износной, так как построена на основе данных только об износе трущегося сопряжения. Возможной экспериментальной базой первого подхода являются испытания при фиксированной температуре (термостатирование трибосистемы). Второй подход предполагает, что информация о линейном размере узла трения поступает и фиксируется непосредственно в процессе его испытаний. Получаемая при этом характеристика является интегральной, так как построена на основе данных об одновременно протекающих процессах теплового расширения (дилатации) и изнашивания узлов трения. С учетом двойственной природы такой характеристики, ее можно назвать термоизносной. И, наконец, третий подход предусматривает использование данных о чистом (без износа) тепловом расширении–дилатации трибосистем. Четкое разделение этих подходов позволит избежать многих недоразумений и неточностей при представлении и интерпретации результатов износных испытаний и, соответственно, повысить их объективность.

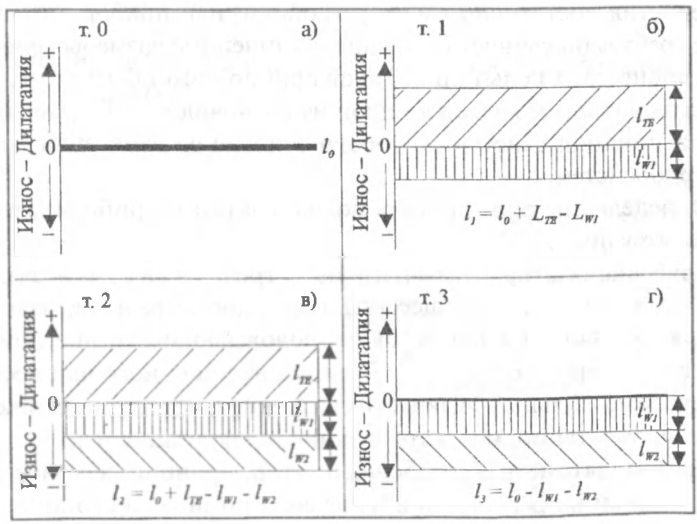


Рис. 2.2. Влияние изнашивания и дилатации на изменение линейного размера трибосистемы (ТС): а–г – соответствуют состояниям ТС, обозначенным на рис. 2.1 точками 0, 1, 2, 3.

Следует отметить, что в представленной выше схеме не учитывался еще один фактор, а именно – деформация трибосистем, также

обусловливающая изменение размеров узлов трения. В ряде случаев, особенно при работе трибосопряжений в условиях значительных переменных нагрузок, а также использовании для их изготовления высокоэластичных материалов, этот фактор может вносить наибольший вклад в изменение линейных размеров подшипниковых узлов.

Вышеприведенные рассуждения позволяют дать определения терминам: термоизносная характеристика и термоизносное состояние материала.

Термоизносная характеристика – кинетическая зависимость номинального линейного размера трибосистемы или ее отдельных элементов от износа и дилатации.

Под номинальным линейным размером трибосистемы или ее отдельных элементов следует понимать величины этих параметров, определенные их функциональным назначением.

Термоизносное состояние – состояние элемента или всей трибосистемы, характеризующееся одновременно протекающими процессами изнашивания и дилатации.

С технической точки зрения для получения термоизносных характеристик достаточно иметь устройство или прибор, позволяющие с требуемой точностью оценивать линейные размеры трибосистем в процессе их испытаний. Такой прибор может быть назван трибодилатометром и является одной из разновидностей трибоанализатора, принцип действия которого основан на измерении дилатации трибосистем.

Определения терминов трибоанализатор и трибодилатометр приводятся ниже.

Трибоанализатор (от греч. trobos – трение и analysis – разложение) – устройство, являющееся частью трибометра и предназначенное для исследования процессов, сопровождающих трение, принцип действия которого основан на использовании одного или нескольких фундаментальных физических явлений, например, акустической эмиссии, дилатации, магнитострикции, поляризации и др.

Трибодилатометр – трибоанализатор, принцип действия которого основан на регистрации изменения номинального линейного размера трибосистемы или ее отдельных элементов.

Так как внешнее трение и сопутствующее ему изнашивание являются, по существу, пограничными процессами физико-химической механики при взаимодействии твердых тел с учетом влияния окружающей среды, то это позволяет дать определение тому разделу три-

бологии, предметом которого является изучение закономерностей изнашивания и дилатации в процессе испытаний или эксплуатации разнообразных трибосистем и включить его в качестве составной части трибодиагностики в трибомониторинг.

Трибодилатометрия – одно из направлений трибодиагностики, предметом которого являются закономерности изменения размеров трибосистем или их отдельных элементов в результате трения при воздействии факторов окружающей среды.

Необходимо отметить, что трибодилатометрия должна рассматриваться как часть системы трибологических испытаний материалов, представляющей собой совокупность функционально взаимосвязанных технических устройств, методов исследований и исполнителей для выполнения в регламентированных условиях испытаний модельных и/или натурных узлов трения.

Также следует принять во внимание, что культура созидания и общения с предметным миром современной техногенной цивилизации не имеет национальной специфики и что главным в ее восприятии является общедоступность кода (языка), а не уникальность национальной формы этого кода.

2.2. Методики исследования изнашивания и дилатации трибосистем

[925, 927, 928, 930, 934, 936, 938, 946, 958, 959, 961, 962]

Одно из ведущих направлений современной трибологии – создание диагностических методов, инструментов и комплексов, позволяющих на стадии триботехнических испытаний оценивать процессы приработки, стационарные и нестационарные режимы эксплуатации узлов трения, например, пусковые периоды, моменты изменения нагрузочно-скоростного режима и т. д. Обеспечение таких возможностей позволит более обоснованно осуществлять подбор пар трения для подшипниковых узлов.

Методология исследования изнашивания и дилатации трибосистем (МИИДТ) включает в себя несколько методик измерений общего характера, в частности, теплового расширения, изнашивания и деформации, каждая из которых, в свою очередь, является основой для разработки ряда частных методик измерений. При этом каждую конкретную методику исследования следует рассматривать как некоторое обобщенное понятие, включающее в себя процедуру использования соединенных между собой и с изучаемым объектом техни-

ческих средств и направленную на получение запланированного результата, отражающего определенные свойства объекта измерений. Целесообразно определять каждую методику вне объекта измерений, так как одна и та же методика может использоваться при изучении свойств разных трибосистем (рис. 2.3). При этом результаты измерений могут получаться с разными погрешностями, но методика может оставаться при этом одной и той же. Необходимо учитывать параметры изучаемого объекта, например, условия работы и факторы окружающей среды. Характерной особенностью узлов трения скольжения и качения является то, что они характеризуются значительными радиальными биениями, часто достигающими значений нескольких десятков или даже сотен микрометров. Можно с полной уверенностью утверждать, что без устранения радиальных биений практически невозможно осуществлять измерения износа, теплового расширения и деформации узлов с прецизионной (микронной) точностью.

Влияние теплового расширения и деформации трибосопряжений на результат измерения износа затрудняет получение однозначных выводов о фрикционных свойствах тестируемой пары трения особенно в пусковой период или при смене нагрузочного режима испытаний. В этой связи разрабатываемые методики должны предусматривать раздельную оценку того вклада, который вносят в изменение линейных размеров подшипниковых узлов их изнашивание, деформация и тепловое расширение.

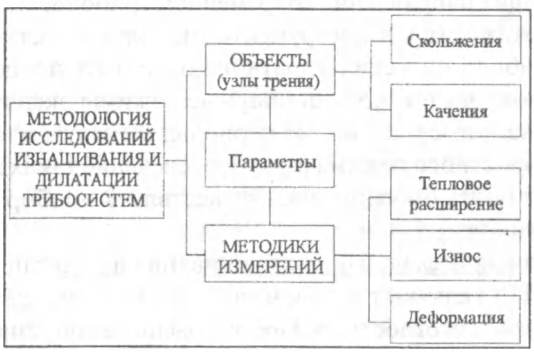


Рис. 2.3. Методология исследований изнашивания и дилатации трибосистем: объекты и методики исследований

Кроме того, в условиях реальной эксплуатации машин их работа происходит при постоянном изменении рабочих режимов (в пер-

вую очередь, нагрузки и скорости), например, имеет место чередование периодов пуска, работы и «отдыха» (остановки) узлов трения. Такие условия работы (испытаний) трибосопряжений существенно отличаются от так называемых стационарных режимов, например, осуществляемых при постоянных значениях нагрузки и скорости в течение достаточно продолжительного времени. В этой связи изучение изнашивания пары трения целесообразно проводить при непрерывном прецизионном контроле и в относительно короткие промежутки времени. Необходимость создания таких методик и оборудования определяется и тем, что износ в нестационарном режиме, например, при пуске, может быть значительно выше, чем за весь длительный стационарный режим эксплуатации, а также отсутствием в литературе достоверных данных по механизму изнашивания, его интенсивности в условиях изменяющихся термофрикционных нагрузок.

Для конкретных типов испытываемых сопряжений (узлов трения скольжения и качения) при заданных значениях измеряемых величин и условий испытаний, используемые методики должны обеспечивать получение результатов измерений с погрешностями, величины которых не выходят за заданные допустимые пределы.

Кроме того, при разработке методик измерений изнашивания и дилатации трибосистем следует четко сформулировать два исходных положения: задачу измерений и модель объекта измерений.

Под задачей измерений следует понимать задачу, которая должна быть решена путем измерений. Как следует из вышеизложенного, задачей каждой конкретной методики измерений и МИИДТ в целом является определение того вклада, который вносят в изменение линейных размеров трибосистем тепловое расширение (дилатация), изнашивание и деформация элементов, образующих трущуюся пару.

В общем случае необходимо считать, что формулировка задачи измерений и описание объекта измерений должны задаваться как исходные данные, необходимые для разработки методик измерений. Кроме того, должны быть заданы характеристики внешних условий проведения измерений и режимы работы (испытаний) объекта, а также пределы допустимых погрешностей измерений.

Выбор и описание модели объекта измерений должны позволить окончательно определить ее параметр как «измеряемую величину».

Анализ вышеприведенных соображений, касающихся свойств трибосопряжений и анализа физических параметров диагностирования (глава 1), а также использованных в исследованиях моделей

узлов трения скольжения и качения (рис. 2.4–2.5), позволяют считать, что в трибодилатометрии в качестве такого параметра лучше всего использовать линейный размер трибосистем. Выбор указанного параметра позволит осуществлять прямые измерения линейного износа, теплового расширения и деформации трибосопряжений, имеющих одну размерность. Кроме того, линейный размер подшипниковых узлов обеспечивает возможность оценки и сравнения значений этих факторов, а также использования полученных данных при расчетах, например, долговечности трущихся пар.

В качестве элементов исследованных трибосистем использовались ролики, изготовленные из стали 45 (ГОСТ 1050-74), стали 40Х (ГОСТ 4543-71), стали ШХ-15 (ГОСТ 801-78), чугуна СЧ20 (ГОСТ 1412-79) и др. Ролики имели внешний диаметр 40 мм, толщину 12 мм и посадочное отверстие диаметром 16 мм. Колодка (частичный вкладыш) представляла собой 1/6 часть кольца, имеющего внутренний диаметр 40 мм, внешний – 60 мм и толщину – 10 мм. Для изготовления вкладышей использовали антифрикционную бронзу БрО5Ц5С5 (ГОСТ 613-79), сталь Ст3 (ГОСТ 380-71) и баббит БК-2 (ТУ 15-Д100), полиамид П-6 стеклонаполненный (ТУ 6–05–24–953-74), полиамид ПА-6 + 5 мас. % полиэтилена или полипропилена, резину № 3826 на основе искусственных каучуков и некоторые другие материалы. Коэффициент взаимного перекрытия составлял 1 : 7.5.

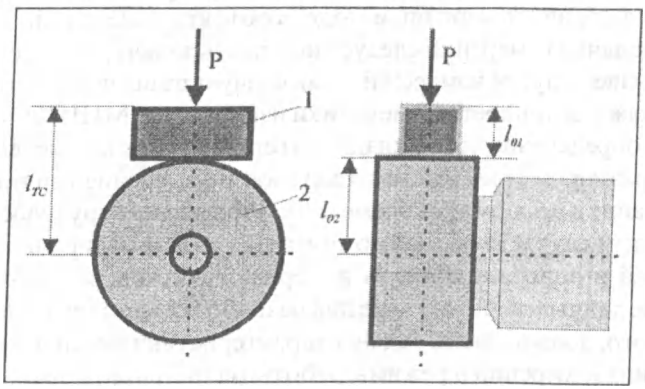


Рис. 2.4. Модель узла трения скольжения: *1* – образец; *2* – контробразец; $l_{тс}$ – линейный размер трибосистемы; l_{01} и l_{02} – линейные размеры образца и контробразца, соответственно.

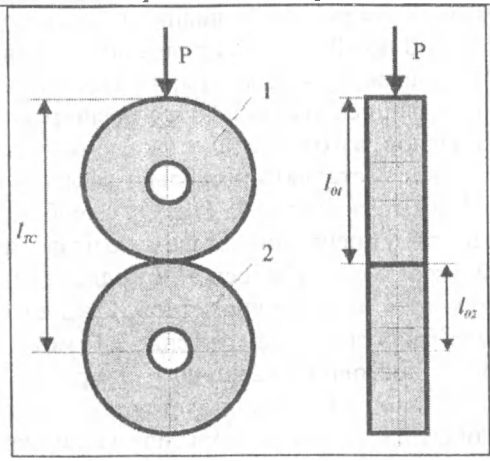


Рис. 2.5. Модель узла трения качения: *1* и *2* – верхний и нижний испытываемые образцы; $l_{тс}$ – линейный размер трибосистемы; l_{01} и l_{02} – линейные размеры образцов.

В общем случае (рис. 2.4, 2.5) исходный линейный размер трибосистем определялся из выражения

$$l_{TC} = l_{01} + l_{02}\,l\,2. \qquad (2.1)$$

В процессе испытаний составляющие выражения (2.1) изменяют свои значения вследствие изнашивания, деформации и теплового расширения деталей трения трибосистем:

$$l_{01} = l_{TE1} - l_{W1} - l_{D1} \text{ и } l_{02} = l_{TE2} - l_{W2} - l_{D2}. \qquad (2.2)$$

Оценивая тенденции развития современной триботехники, можно сделать достаточно уверенный прогноз о направлениях создания перспективных конструкций узлов трения. В машинах XXI-го века будут широко использоваться трибосопряжения, детали которых будут изготавливаться из традиционных материалов триботехнического назначения – металлов; относительно новых, появившихся примерно полвека тому назад, синтетических материалов – полимеров, а также комбинированных материалов, содержащих металлическую основу, на которую нанесен тонкий слой композита на полимерной основе. Для примера на рис. 2.6 схематически приведены конструкции таких узлов трения скольжения, а на рис. 2.7 – их тепловое расширение. Как следует из представленных данных, дилатация трибо-

систем для всех типов сопряжений в диапазоне температур 348–373 К имеет значение от 30 до 90 мкм. Наибольшие значения характерны для сопряжений, содержащих элементы, изготовленные из материала с высоким коэффициентом линейного расширения (полимера). Деформация образцов, изготовленных из высокоэластичных материалов, также может составлять несколько десятков микрометров (составляющая l_D в выражениях 2.2). Наряду с необходимостью осуществлять диагностику прецизионных пар, это позволяет определить диапазон линейных размеров трибосистем, подлежащих контролю – от долей до двух–трех сотен микрометров. Следует отметить, что линейный размер трибосистем (выражение 2.1) может быть уменьшен на некоторую постоянную величину, например, радиус вала. Такой прием довольно часто используется в методах статистической обработки опытных данных и, практически не оказывая какого-либо негативного влияния на точность измерений, позволяет значительно сократить объем вычислительной работы.

При разработке МИИДТ следует разделять сами методики измерений и их техническую реализацию на практике. Целесообразно сначала разрабатывать непосредственно сами методики измерений, а потом – все, что связано с их материальным воплощением на практике, включая необходимые для этого технические средства, приборы, приспособления и др. (рис. 2.8).

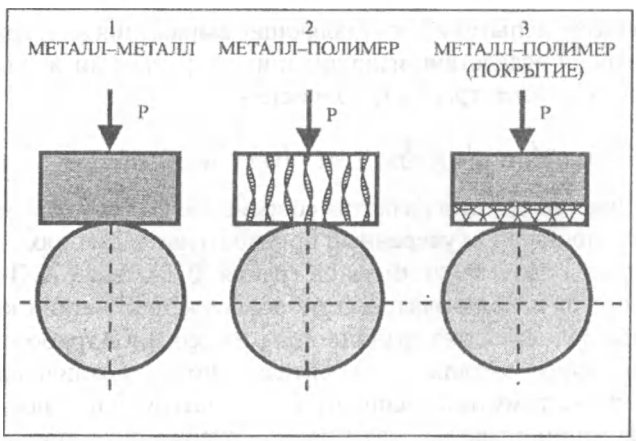


Рис. 2.6. Типы перспективных узлов трения

В процессе разработки методик измерений должны всесторонне рассматриваться и анализироваться технико-экономические, метро-

логические, эргономические и другие аспекты задачи, а также исходные данные для ее решения, включая формулировку самой задачи. Кроме того, необходимо оценивать степень влияния внешних факторов, эффективность методик и используемых методов обработки опытных данных. В этой связи значительный интерес представляют исследования закономерностей изменения линейных размеров трибосистем, испытываемых в разных средах (в первую очередь, воздушной и жидкой).

Необходимо знать, с какой целью производятся измерения изнашивания и дилатации трибосопряжений и какого порядка величины подлежат измерению. В большей степени ответы на эти вопросы были уже даны ранее. Кратко отметим следующее. Создание методик, позволяющих устранять негативное влияние радиальных биений узлов трения, например, типа вал–вкладыш, в конечном счете, обеспечит существенное повышение трибологической надежности трибосистем. Во-первых, новые данные о закономерностях теплового расширения сопряжений позволят более объективно рассчитывать элементы конструкций подшипниковых узлов применительно к конкретным режимам их эксплуатации. Во-вторых, за счет разделения эффектов деформации, теплового расширения и изнашивания трибосистем представляется возможным существенно повысить объективность данных о износостойкости материалов, и за счет этого оптимизировать технические и экономические характеристики машин.

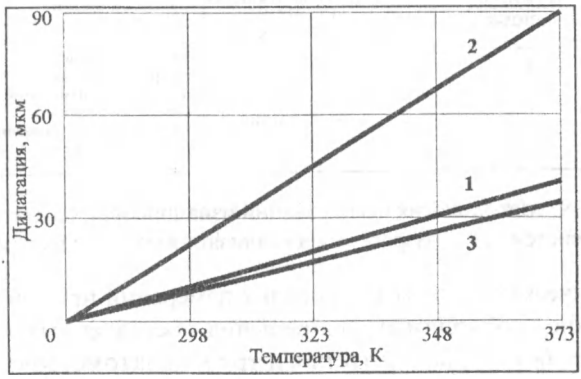


Рис. 2.7. Зависимость дилатации (l_{TC}) от температуры для узлов трения скольжения; l_{01} = 10 мм, l_{02} = 20 мм; *1* – сталь (вал)–бронза (вкладыш), *2* – сталь–полимер, *3* – сталь–сталь с полимерным покрытием толщиной 0,25 мм.

Как правило, разработка методик должна завершаться их апробацией (аттестацией) и изготовлением макета измерительного устройства.



Рис. 2.8. Методология исследований изнашивания и дилатации трибосистем (ТС): разработка и реализация методик измерения

Практическая реализация методик измерений предусматривает изготовление необходимых для решения поставленных задач устройств и приборов (машин трения и трибодилатометров), экспериментальную проверку измерительных методик и их аттестацию. Сравнение метрологических характеристик разработанных методик с уже известными стандартными методами аналогичных испытаний позволит оценить их технико-экономический уровень и эффективность.

Разработаны методики исследования изнашивания и дилатации,

в которых величину износа при разогреве пары трения определяли как разность между начальной (до изнашивания) и конечной (после изнашивания и охлаждения испытываемого узла трения) точек отсчета. Испытания проводили на машинах СМТ-1 (ТОЧМАШ, Россия) и Т-05 (производитель – департамент трибологии Института технологии эксплуатации, г. Радом, Польская Республика) по схеме вал–вкладыш в условиях трения без смазочного материала. Вал был изготовлен из стали ШХ-15 диаметром 40 мм, рабочая поверхность полимерного вкладыша составляла 2 см^2. Шероховатость стального вала контролировали с помощью профилометра 170621 и поддерживали на двух уровнях: R_a = 0,37 и 1,95 мкм. Приработку и испытания трибосистем проводили при давлении 0,25 и 0,5 МПа и скорости скольжения 0,21 м/с.

Обработку результатов исследований износа, полученных при пуске и более длительных периодах испытаний, проводили с помощью методики «начальной и конечной» точек отсчета, а также путем определения «двойной величины износа» при пуске (рис. 2.9).

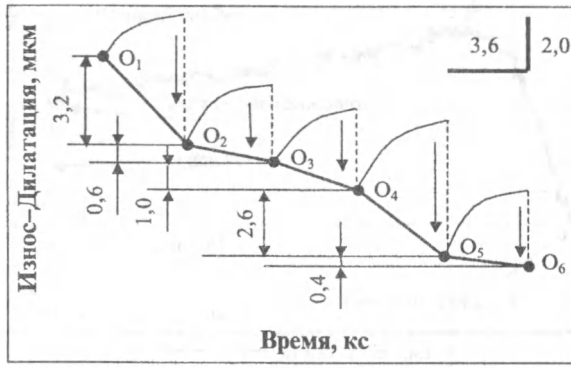


Рис. 2.9. Термоизносная характеристика трибосопряжений сталь (ШХ-15)–композиционный полиамид, полученная в режиме испытаний «пуск–остановка». Условия испытаний: трение без смазочного материала; давление — 0,25 МПа, скорость — 0,21 м/с и R_a = 1.95. мкм O_1–O_2 — точки отсчета по циклам испытаний.

Первая методика включает в себя получение «начальной» точки отсчета, запись кривой теплового расширения пары трения и «конечной» точки отсчета после испытаний, охлаждения машины и контрольного пуска машины на несколько секунд.

По-существу, всю методику можно представить состоящей из

последовательного ряда циклов испытаний. Схематическое изображение отдельного такого цикла представлено на рис. 2.10.

При проведении таких циклических испытаний их продолжительность является одним из важнейших методических факторов, варьируя который удается моделировать и исследовать различные режимы (периоды) работы машин. Например, осуществление испытаний при относительно малых продолжительностях работы узлов позволяет изучить их изнашивание в режиме пуск–остановка, характерном для работы большинства транспортных, сельскохозяйственных и ряда других машин.

Следует отметить, что кривая, описывающая единичный цикл испытаний (рис. 2.10), состоит из периодически повторяющихся участков изнашивания и дилатации узлов трения. Это может быть связано со сложным характером процессов, протекающих в зоне фрикционного контакта тел.



Рис. 2.10. Схематическое представление единичного цикла испытаний узлов трения

Разность между линейными размерами трибосистемы, соответствующими точкам от O_1 до O_6 на рис. 2.9, позволяет определить ее износ в условиях принятых режимов испытаний. В проведенных исследованиях (пара сталь–композиционный полиамид) продолжительность периодов разогрева и охлаждения определялась по моменту стабилизации температуры в зоне фрикционного контакта и составляла, как правило, 4,8 и 1,8 кс.

Повторение рассмотренного цикла необходимое количество раз

позволяет построить термоизносную кривую образца в режиме пуск-остановка по точкам O_1–O_6, принимая за начальную точку отсчета т. O_1 (рис. 2.9).

При проведении длительных испытаний образцов (рис. 2.11) обработку результатов измерений проводили по следующей схеме:

1. Запись экспериментальной кривой износа с участками разогрева и стационарного износа.

2. Определение конечной точки отсчета после износа, охлаждения и контрольного пуска.

Т. е., по-существу, проводился один цикл испытаний (рис. 2.10) с продолжительностью в несколько десятков, а в ряде случаев сотен часов.

Величину двойного износа в пусковой период находили из рассмотренных отрезков *аб*, *бв*, aO_1 и *вс* (рис. 2.11). Из рисунка следует, что отрезок *аб* определяет стационарный износ, а отрезок *бв* характеризует изменение показаний регистрирующего прибора после охлаждения узла трения и его контрольного пуска. Точка *в* является в данном случае конечной точкой отсчета.

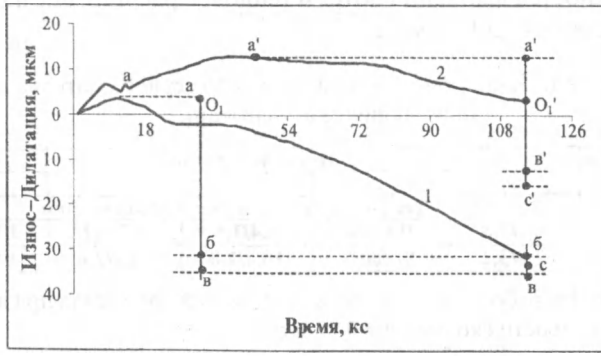


Рис. 2.11. Термоизносные характеристики трибосопряжений сталь–композиционный полиамид, полученные при давлении 0,25 МПа, скорости 0,21 м/с, R_a = 1.95 мкм (1) и 0,37 мкм (2); аб, бв – износ в стационарном периоде и показания трибодилатометра после остановки, охлаждения и контрольного пуска узла трения, соответственно.

Расстояние от оси времени на рис. 2.11 и 2.12 до точки *а* обозначим как aO_1, равное разности теплового расширения и износа при пуске:

$$aO_1 = \Delta h_{\text{расш}} - \Delta h_{\text{ти}}. \qquad (2.3)$$

Тогда отрезок *бв* можно определить как сумму деформации охлаждения и износа при пуске:

$$бв = Dh_{охл} + Dh_{ти}. \quad (2.4)$$

При выполнении условия $\Delta h_{охл} = \Delta h_{расш}$ разность этих отрезков равна двойному износу образца при пуске:

$$бв - aO_1 = 2Dh_{ти} = вс. \quad (2.5)$$

Выражение (2.3) может также быть дополнено членом, более точно учитывающим износ за период времени от начала испытаний до тепловой стабилизации трибосистемы.

С помощью методики начальной и конечной точек отсчета изучены процессы изнашивания полимерного образца в условиях пуска (табл. 2.1).

Установлено, что при разной шероховатости тепловое расширение существенно различается на первом цикле пуска. В этот период происходит интенсивное формирование вторичных структур полимера на поверхности металла. В дальнейшем условия контактирования поверхностей выравниваются и тепловое расширение находится в пределах от 8,4 до 11,6 мкм.

Табл. 2.1. Износ композиционного полимерного материала при циклических испытаниях

Шероховатость вала, R_a, мкм	Циклы испытаний				
	1	2	3	4	5
	Тепловое расширение / износ образцов, мкм				
0,37	6,6/3,8	9,6/0,4	8,4/1,6	9,2/1,2	10,2/1,0
1,95	2,0/3,2	11,6/0,6	10,4/1,0	11,2/2,6	10,8/0,4

Примечание. Приработку и испытание сопряжений проводили при давлении 0,25 МПа и скорости скольжения 0,21 м/с.

В то же время величина износа от цикла к циклу изменяется скачкообразно (табл. 2.1). Измерение износа с чувствительностью прибора 1,25 мкм на 1 мм шкалы регистрирующего устройства (самописца) позволяет определить эти колебания от цикла к циклу как затухающий волновой процесс, связанный с особенностями приработки при каждом пуске испытательной машины. При этом величина износа может быть выше или ниже в зависимости от характера изменения нагрузочно-скоростного режима пары трения.

В качестве примера можно привести результаты износных испытаний полимерного образца, приработанного при давлении 0,5 МПа.

Снижение давления при испытаниях до 0,25 МПа существенно меняет износ в пусковой период в сторону уменьшения. Только после четырех восьмичасовых циклов с остановками на охлаждение получена характерная для такой нагрузки кривая износа, показанная на рис. 2.11 (кривая 2).

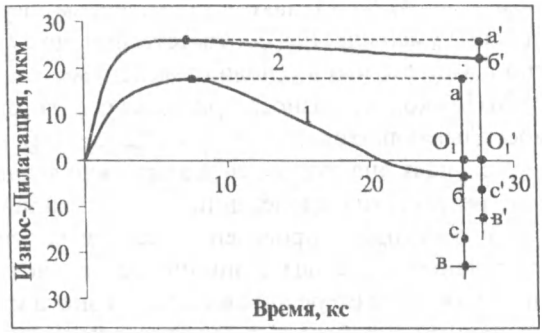


Рис. 2.12. Термоизносные характеристики трибосопряжений сталь (ШХ–15) – композиционный полиамид, полученные при давлении 0,5 МПа, скорости 0,21 м/с, R_a=1,95 мкм (1) и 0,37 мкм (2); условия приработки: давление – 0,25 МПа, скорость – 0,21 м/с; аб, бв – износ в стационарном периоде и показания анализатора после остановки, охлаждения и контрольного пуска узла трения, соответственно.

Обработка экспериментальных зависимостей, представленных на рис. 2.11, 2.12 с использованием описанных выше методик, позволила оценить влияние пускового износа (*вс*/2) на точность определения стационарного (*аб*) и суммарного (*аб* + *вс*/2) износов.

Из таблицы 2.2 видно, что пусковой износ зависит от нагрузки, шероховатости и особенностей изнашивания полимерного образца.

Табл. 2.2. Результаты длительных испытаний образцов композиционного материала при различных давлениях и шероховатости стального вала

R_a, мкм	P, МПа	*аб*/*t*, мкм/ч	*вс*/2*t*, мкм/ч	*вс*/(*аб*-*вс*/2), %	*вс*/2*аб*, %	$I_{аб}$, мкм/ч	$I_{аб}$+*вс*/2, мкм/ч	$I_{вс}$/2, мкм/ч
1,95	0,25	34/32	0,88/4	2,5	2,6	1,1	1,1	0,22
	0,5	21/5,5	4,5/2,2	17,6	21,4	3,8	3,3	2,0
0,37	0,25	10,1/32	-1,3/11	-14,1	-12,4	0,32	0,28	-0,11
	0,5	4/5,8	4,5/2,2	47,4	112,5	0,69	1,06	2,0

Примечание: *t* – время испытаний; *аб* и *вс* по рис. 2.11, 2.12.

В условиях длительного эксперимента (свыше 32 часов) при низкой нагрузке доля пускового износа как в стационарном, так и в сум-

марном износах не превышает 3 %, а при интенсивном переносе полимера на металл (R_a = 0,37 мкм) имеет отрицательное значение (табл. 2.2).

При длительности эксперимента до 6 часов доля пускового износа полимерного образца в стационарном износе возрастает до 112 %, а в суммарном – до 47 %. Однако с повышением шероховатости стального вала она уменьшается, соответственно, до 17 и 21 %.

Интересно отметить, что в условиях экспериментов только при нагрузке 0,25 МПа скорость износа при пуске соответствует критерию для самосмазывающихся материалов (0,25 мкм/ч), в остальных исследованных случаях она оказалась значительно выше (табл. 2.2).

Обобщение результатов проведенных исследований позволило предложить новую методику проведения ресурсных испытаний узлов трения, отличающуюся повышенными достоверностью получения данных и точностью измерений линейного износа узлов трения, а также более простой обработкой результатов испытаний.

Сущность методики заключается в том, что испытания трибосопряжений проводятся циклически в режиме работа–остановка при непрерывном контроле линейного размера образцов с учетом их теплового расширения. Оптимальную продолжительность испытаний определяют по периоду стабилизации линейного размера исследуемых трибосистем. После завершения испытаний регистрируют изменение линейного размера трибосопряжения и термостатируют его до заданной температуры. Далее включают привод машины трения и фиксируют начальное значение последующего цикла испытаний, а величину абсолютного износа за цикл определяют как разницу между начальными значениями линейного размера текущего и последующего циклов. Для получения динамики изнашивания трибосопряжений циклы испытаний последовательно повторяют требуемое количество раз, зависящее от величины предельного износа, погрешности и чувствительности метода измерений, требований к точности оценки результатов испытаний и др. Характер изнашивания при этом представляется возможным оценить по начальным значениям циклов испытаний.

Методика проведения ресурсных испытаний узлов трения позволяет:

- оценивать динамику изнашивания узла трения при режимах, приближенных к условиям эксплуатации большинства реальных узлов трения (работа в режиме пуск–остановка);
- установить оптимальную продолжительность цикла испыта-

ний самых разнообразных триботехнических материалов и оценивать величину их теплового расширения при заданных условиях трения;

- путем введения операции термостатирования сопряжений проводить испытания при постоянных или переменных заданных начальных режимах трения.

Использование новых методик оценки термоизносных характеристик позволяет достаточно быстро и надежно осуществлять выбор триботехнических материалов по критерию максимальной скорости изнашивания в пусковой период.

Кроме того, с помощью разработанных методик можно обнаружить и исследовать малые периодические колебания линейных размеров трибосистем, обусловленные их дилатацией и изнашиванием.

2.3. Факторы, влияющие на точность и воспроизводимость результатов измерений

[925, 927, 930, 936, 946, 961, 962]

К числу факторов, оказывающих существенное влияние на результаты износных испытаний трибосистем, относятся: шероховатость трущихся поверхностей, нагрузочно-скоростные режимы приработки и последующих испытаний узлов, качество выполнения технологических операций монтажа–демонтажа испытываемых узлов трения, степень очистки поверхностей трения, деформационные свойства материалов трибосопряжений, относительная влажность воздуха в помещении исследовательской лаборатории и др.

Проведенные исследования показали, что шероховатость рабочих поверхностей валов и вкладышей подлежит постоянному контролю, так как оказывает значительное влияние на линейные размеры испытываемых сопряжений (рис. 2.11, 2.12). Увеличение шероховатости стального вала (сталь NC6 HRC 59-62, PN-77/H-85023), работавшего в паре с вкладышем из полиамида, содержавшего 5 мас. % кокса, обуславливает увеличение износа и снижение дилатации сопряжений. При этом увеличение параметра R_a стального вала с 0,37 до 1,95 мкм вызывает примерно в такой же пропорции и уменьшение значений максимального теплового расширения испытываемых узлов трения (рис. 2.11, 2.12). Некоторые отличия, которые все же имеют место в данном случае, обусловлены разным временем выхода сопряжений в режим стабилизации температурного режима работы и, как следствие, отличающимися значениями их износа, соответству-

ющими этим состояниям. Абсолютная величина износа трибосистем с более шероховатыми стальными валами примерно в три раза выше, чем у узлов с менее шероховатыми.

Повышение нагрузки, при прочих равных условиях проведения исследований, приводит к весьма значительному увеличению тепловой нагруженности узлов (рис. 2.11, 2.12). Весьма характерно, что при этом отмечается снижение влияния шероховатости стального вала на абсолютные значения теплового расширения сопряжений. Так, если тепловое расширение узлов с менее шероховатым валом при давлении 0,25 МПа (рис. 2.11) превышало тепловое расширение узлов с более шероховатым валом в 4,6 раза, то при давлении 0,5 МПа – только в 1,25 раза (рис. 2.12).

На рис. 2.13 представлены результаты исследований влияния скорости скольжения на износ и дилатацию сопряжений сталь (NC6)–полиамид 6 (BN-81-6336-02.00). Увеличение скорости приводит к более сильному росту дилатации, нежели износа и коэффициента трения испытываемых пар.

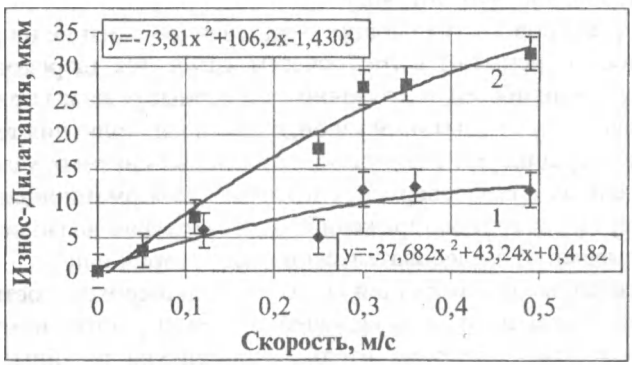


Рис. 2.13. Влияние скорости скольжения на износ (1) и дилатацию (2) сопряжения сталь-полиамид 6; нагрузка – 600 Н, время испытаний – 4,0 кс.

Аналогичные по своему характеру результаты были получены и при испытании сопряжений сталь–бронза при трении без смазочного материала (глава 4).

Эти факты должны быть предметом серьезного внимания исследователей-трибологов как потенциальный источник весьма значительных погрешностей измерений.

Например, из данных, представленных на рис. 2.13, видно, что при испытаниях со скоростью 0,5 м/с величина теплового расшире-

ния практически в два с половиной раза превышает величину износа трибосопряжений. Именно этим могут объяснены результаты некоторых экспериментов по изнашиванию материалов, показывающие возможность практически полного отсутствия износа, а в некоторых случаях даже его «положительные» значения, особенно в начальном периоде работы испытываемых трибосистем.

Исследования позволили установить, что в ряде случаев форма термоизносной характеристики заметно отличалась от представленных ранее на рис. 2.10–2.12. В отношении начального периода испытаний (рис. 2.14) наиболее вероятной причиной этого является несоответствие скоростных режимов приработки и последующих исследований трибосопряжений. Кроме того, полученная при высокой чувствительности трибодилатометра термоизносная характеристика, фактически состоит из последовательно чередующихся циклов износа и дилатации сопряжений. Например, для пары сталь–композиционный полиамид, амплитуда этих циклов равняется нескольким микрометрам, а их продолжительность может находиться в пределах от долей до нескольких кс.

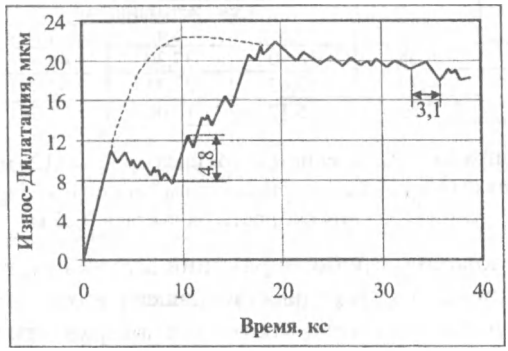


Рис. 2.14. Термоизносная характеристика сопряжения сталь – композиционный полиамид, полученная при высокой чувствительности трибодилатометра PCLW – 01: давление – 0,25 МПа, приработка и испытания сопряжений, соответственно, при скоростях 0,21 и 0,27 м/с, R_a=0,37 мкм.

Весьма важным с методической точки зрения является учет предыстории работы сопряжений, т. е. тех нагрузочно-скоростных, температурных и других условий, при которых они работали (прирабатывались) непосредственно перед проведением контрольных испытаний. Проведенные эксперименты показали, что испытания при более высокой, по сравнению с режимом приработки, скорости сколь-

жения характеризуются также и более высокими значениями интенсивности изнашивания узлов трения сталь–бронза. Испытания таких сопряжений при меньшей, по сравнению с режимом приработки, скорости приводят лишь к незначительному снижению интенсивности изнашивания узлов трения. Аналогичные результаты были получены при проведении испытаний сопряжений с фиксированной скоростью, но изменяющейся в большую или меньшую сторону по сравнению с приработкой, нагрузкой (табл. 2.3).

Совершенно очевидно, что условия работы узлов, предшествовавшие их контрольным испытаниям, определяют некоторое исходное качество поверхности (Q), включающее в себя комплекс микро- и макрогеометрических характеристик, структурных образований, физико-механических свойств поверхностных слоев, режимов испытаний и др.

Табл. 2.3. Влияние нагрузочно-скоростных режимов приработки и последующих испытаний на изнашивание пар трения скольжения

Давление,* МПа	Износ, мкм				
	Время испытаний, кс				
	1,8	3,6	5,4	7,2	9,0
0,20	6,38	18,90	32,30	45,55	59,10
0,15	4,70	13,62	22,83	32,83	42,29
0,10	2,33	5,12	10,00	15,08	19,71

Примечание. Приработка (давление 0,15 МПа, скорость 0,125 м/с) и износные испытания сопряжений осуществлялись без смазочного материала;
* – для всех значений давления скорость равнялась 0,25 м/с.

При исследованиях трибосопряжений в условиях, отличающихся от условий приработки (предшествовавшей работы), эти качественно-количественные показатели состояния поверхности изменяются. С позиций системного анализа реальные входы трибосистемы, например, нагрузка и скорость, должны учитывать также аналогичные величины, при которых узел работал в предиспытательный период. Т. е. для повышения точности трибологических тестов необходимо стремиться к тому, чтобы условия предыстории (за исключением специальных исследований) максимально соответствовали условиям испытаний сопряжений. Иными словами, необходимо, чтобы выполнялось условие:

$$\sum \left| Q_{\text{прир}} - Q_{\text{исп}} \right| \Rightarrow \min. \qquad (2.6)$$

Для проверки выполнимости условия (2.6) в отношении нагрузочно-скоростных режимов испытаний трибосистем используем «коэффициент трансформации» К, содержащий широко применяемый в триботехнике критерий *[pv]*:

$$K = [pv]_{\text{прир}} / [pv]_{\text{исп}}. \qquad (2.7)$$

Физический смысл коэффициента *K* состоит в том, что он характеризует собой качественные параметры поверхностных слоев элементов трибосистемы, приобретаемые ими в процессе трансформации (передачи и преобразования) энергии в зоне фрикционного контакта тел. Так, значение $K > 1$ свидетельствует о том, что испытываемые в заданных условиях образцы обладают более высоким исходным качеством, выражающимся, например, в их способности сопротивляться изнашиванию по сравнению с тем качеством, которым они будут обладать после завершения испытаний. И, наоборот, значения $K < 1$ свидетельствуют о более высоком качестве рабочих поверхностей испытанных трибосопряжений по сравнению с тем качеством, которым они обладали перед началом испытаний. И в том, и в другом случае коэффициент *K* является своеобразной мерой, позволяющей сравнить между собой параметры поверхностей элементов трибосистемы до и после их трибологических испытаний. Переход от одного качества (состояния) испытываемых материалов к другому в процессе испытаний осуществляется за счет энергии трения путем ее преобразования из одних форм в другие и передачи, например, между конструкционными элементами трущихся пар, элементами и окружающей средой и т. д. Нетрудно заметить, что равенство нагрузочно-скоростных режимов приработки и последующих испытаний материалов характеризуется коэффициентом $K = 1$, что, в свою очередь, обеспечивает оптимальную выполнимость соотношения (2.6). Вышеприведенные рассуждения подтверждаются результатами экспериментальных исследований.

Как следует из приведенных данных (рис. 2.15), в процессе испытаний сопряжений сталь–бронза с коэффициентом трансформации $K < 1$ наблюдаются наибольшие изменения значений их теплового расширения и износа. Это объясняется тем, что в данных условиях испытаний узлы трения подвергаются наибольшему энергетическому воздействию, значительная часть которого расходуется на преобразование качественных параметров поверхностных слоев фрикционно контактирующих элементов трибосистем. Трибологические

исследования в условиях, когда нагрузочно-скоростные режимы приработки превышают аналогичные режимы испытаний ($K > 1$), показали практически пропорциональное, а, соответственно, в значительной степени прогнозируемое уменьшение значений дилатации и износа трибосопряжений.

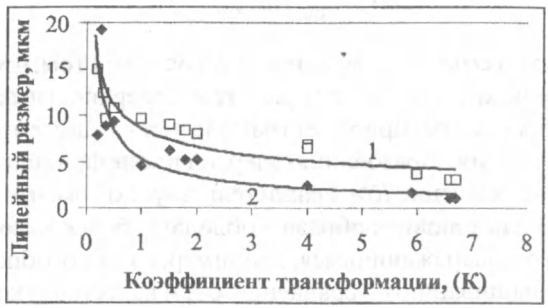


Рис. 2.15. Зависимость износа (1) и дилатации (2) сопряжения сталь (NC6) – бронза (B101) от величины коэффициента трансформации К; время испытаний – 4,0 кс.

Очевидно, что возможно более полное описание качественных характеристик трибосистем требует учета не только нагрузочно-скоростных режимов испытаний, но и также других параметров, например, физико-механических свойств материалов.

Большое влияние на результаты износных испытаний оказывают технологические операции, связанные с подготовкой испытываемых образцов и их установкой на машине трения. Например, демонтаж трущегося сопряжения (рис. 2.16) приводит к его дополнительной микроприработке. Величина приработочного износа при этом равняется нескольким микрометрам и составляет значительную часть (около 15 %) от общей величины износа, полученной в результате испытания узла трения. Негативное влияние неточности монтажа и макрогеометрических характеристик используемых образцов (овальность, конусность и т. д.) на результаты измерений износа в значительной степени проявляется в радиальных биениях испытываемых сопряжений.

Увеличение нагрузки непосредственно в процессе испытаний (работы) приводит к изменению (уменьшению) линейных размеров трибосистемы вследствие деформации ее элементов. В случае сопряжения сталь–бронза (рис. 2.16), испытанного при трении без смазочного материала, общая деформация системы при изменении нагрузки

от 150 до 300 Н составляла от 2,5 до 4 мкм. В общем случае деформируемым элементом может быть также слой смазки, разъединяющий трущиеся детали.



Рис. 2.16. Изменение линейного размера сопряжения сталь – бронза во времени: 1 – испытания после демонтажа трущегося сопряжения; 2 – испытания после демонтажа; скорость скольжения – 0,06 м/с.

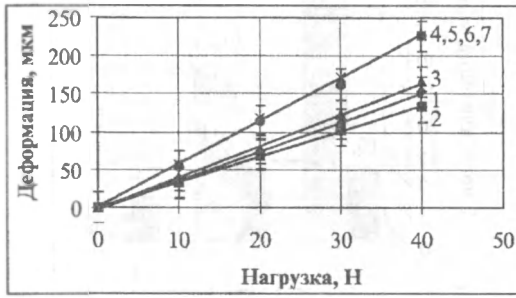


Рис. 2.17. Влияние нагрузки на деформацию резинометаллических трибосопряжений (ТС): 1 – статическая деформация ТС; 2–7 – динамическая деформация ТС; 2–3 и 4–7 – испытания при сухом трении и трении со смазочным материалом; 4–5 и 6–7 – смазочный материал – масло М14 и дизельное топливо Л62; 2, 4, 6 и 3, 5, 7 – скорость испытаний 0,2 и 0,4 м/с, соответственно.

В случае, когда при изготовлении узлов трения использованы высокоэластичные материалы, величина деформации может быть существенно больше. Проведенные исследования (рис. 2.17) выявили, что значения деформации резинометаллических сопряжений, полученные в статических и динамических (при трении без смазочного

материала) условиях (рис. 2.17, прямые 1–3), практически одинаковы. Испытания этих же сопряжений в присутствии смазочного масла М14 и дизельного топлива Л62 показали увеличение деформации примерно на 75 мкм. При этом варьирование скоростей скольжения (0,2 и 0,4 м/с) и вида смазочных сред (М14 и Л62) практически не оказывали какого-нибудь влияния на абсолютные значения деформации трибосистем (рис. 2.17, прямые 4–7). Можно предположить, что установленные особенности деформирования трибосистем связаны со спецификой деформации ее отдельных элементов, например, смазочного слоя, разделяющего трущиеся поверхности.

Разработанные методики контроля линейных размеров трибосистем отличаются высокой чувствительностью и позволяют регистрировать изменения контролируемого параметра как в случае различной степени очистки поверхностей трения материалов (рис. 2.18), так и в случае довольно небольших изменений характеристик (влажности) окружающей среды (рис. 2.19).

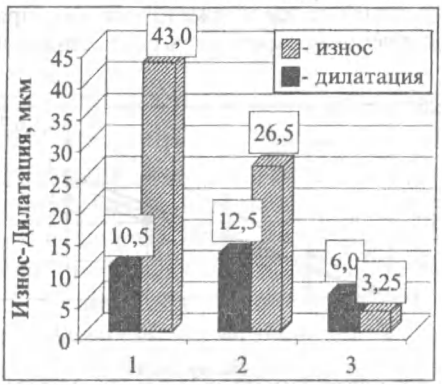


Рис. 2.18. Влияние вида очистки после механической обработки поверхностей вала и вкладыша на износ и дилатацию сопряжений. Вал – сталь ШХ – 15, вкладыш – бронза О5Ц5С5. Нагрузка – 50 Н, скорость скольжения – 0,2 м/с, время испытаний – 1,8 кс. 1 – механическая обработка деталей сопряжения, R_a=0,2 мкм; 2 – механическая обработка с последующей очисткой в содовом растворе; 3 – нанесение на поверхность после механической обработки тонкого слоя масла МС – 20.

Примечательно, что степень очистки поверхностей трения оказывает неадекватное в количественном отношении воздействие на значения дилатации и износа испытываемых трибосистем. Так, в случае присутствия на поверхности вала и вкладыша после механи-

ческой обработки следов смазочного масла МС-20 дилатация сопряжений уменьшилась с 10,5 до 6,0 мкм, а износ – с 43,0 до 3,25 мкм. Несколько нелогичные значения дилатации и износа, полученные в результате испытаний трибосопряжений после их очистки в содовом растворе, объясняются некачественной промывкой деталей после технологической обработки и, как следствие, влиянием компонентов очищающего раствора на триботехнические характеристики узлов трения (рис. 2.18). Изменения относительной влажности воздуха и температуры окружающей среды в помещении исследовательской лаборатории, являющихся соответствующими входами изучаемых трибосистем, влекут за собой и изменения в контролируемых выходах – износе и моменте трения. При этом (рис. 2.19) увеличение относительной влажности воздуха с 44 до 77 % приводит к уменьшению износа трибосистем, соответственно, с 25,0 до 8,0 мкм.



Рис. 2.19. Влияние относительной влажности воздуха на износ трибосопряжений сталь (ШХ – 15) – бронза (О5Ц5С5). Трение без смазочного материала, давление – 0,25 МПа, скорость скольжения – 0,29 м/с, время испытаний – 0,6 кс, температура окружающей среды – 298 К.

В аналогичных условиях испытаний отмечено также уменьшение момента трения сопряжений примерно на 12–17 %. В свою очередь, испытания при постоянной относительной влажности воздуха (51 %) и переменных температурах (286 и 298 К) показали, что с ростом температуры происходят не столь существенные изменения момента трения (увеличение) и износа (уменьшение) трибосопряжений.

2.4. Статистическая обработка результатов эксперимента

[936, 949]

Характерной особенностью испытаний трибосопряжений является

большое число факторов (входы ТС), влияющих на их служебные характеристики (выходы ТС). Именно по этой причине измеренные трибологические параметры, например, износ, часто существенно отличаются друг от друга и имеют большие дисперсии. Широко известны многократно процитированные в ряде статей и монографий данные, представленные В. А. Белым и А. И. Свиридёнком, свидетельствующие о том, что в результате изучения износных характеристик одних и тех же трибоматериалов (меди, латуни, бронзы и стали) в ведущих исследовательских лабораториях 12 стран мира, были получены результаты, отличающиеся друг от друга в 20 раз. Наряду с выбором оптимальных методик испытаний, это заставляет уделять должное внимание статистической обработке результатов измерений износа и дилатации трибосистем, так как они являются основой новой объективной научной информации, позволяющей глубже понять природу процессов трения и изнашивания твердых тел.



Рис. 2.20. Алгоритм статистической обработки экспериментальных данных

Основные классические формулы и таблицы, а также наиболее часто используемая на практике последовательность действий при статистической обработке экспериментальных данных, приведены в Приложении Б настоящей книги.

Статистическая обработка результатов измерений дилатации и износа трибосопряжений выполнялась на персональном компьюте-

ре с использованием пакетов программ статистической обработки данных (Statistica V4.5 и V4.02).

Использованный в работе алгоритм статистической обработки экспериментальных данных представлен на рис. 2.20. В общем случае в алгоритме можно выделить три блока: основы методики статистических вычислений, предварительную обработку результатов измерений и обработку экспериментальных данных.

Основы методики статистической обработки опытных данных включают вопросы разработки модели измерительной системы, анализа видов, источников и значений погрешностей триботестирования измерений.

Модель измерительной системы (рис. 2.21) позволяет в комплексе рассмотреть влияние всех ее элементов и связей между ними на погрешности измерений и разработать предложения по снижению их абсолютных значений.

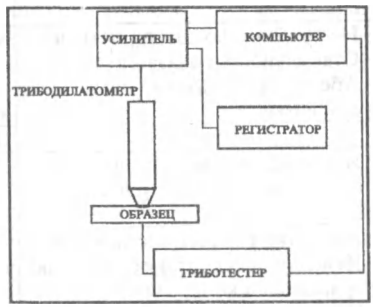


Рис. 2.21. Модель измерительной системы

Рассмотрение модели измерительной системы позволяет также очертить круг факторов, оказывающих влияние на погрешности измерений и, соответственно, точность оценки износа и дилатации трибосистем. Для предварительной оценки величин погрешностей могут быть использованы данные, содержащиеся в технической документации заводов-изготовителей, как отдельных элементов, так и целых блоков измерительной системы (табл. 2.4).

В общем случае, все источники дисперсий результатов триботестирования измерений можно разбить на две группы, зависящие от свойств материалов и используемых методик испытаний.

Состав и геометрические параметры исследуемых образцов материалов являются одними из важнейших факторов, определяющих погрешности измерений. Для уменьшения степени влияния этих фак-

торов (если только это не является целью исследования) следует использовать образцы, изготовленные из стандартизированных материалов; размеры образцов и их шероховатость необходимо контролировать, например, при помощи микрометрических инструментов (цена деления – не более 0,01 мм) и профилографов.

Табл. 2.4. Факторы, оказывающие влияние на погрешности измерений износа и дилатации трибосистем

Элементы измерительной системы	Факторы элементов	Примечания (погрешность измерений, модель и т. д.)
Образец	- Гомогенность состава - Геометрия (макро- и микрогеометрия)	
Трибодилатометр (включая индуктивный датчик)	- Состояние рабочих поверхностей - Режимы работы фрикционов - Регулировка зазоров контактов - Градуировка индуктивного датчика	PCLW-01; погрешность измерений датчика — не более 1 %
Усилитель, отсчетное устройство	- Нелинейность характеристики - Стабильность показаний - Аберрация показаний отсчетного устройства	Мод. 275-01, отклонение от линейности сигнала аналогового выхода не более 1 %
Компьютер		IBM-совместимый
Регистратор	- Износ механических элементов - Стабильность блока усиления сигнала	Погрешность — не более 1 %
Тритестер	- Вибрации рабочей части машины - Наводки в электрических цепях управления и контроля - Износ подшипниковых опор - Износ элементов силоизмерителя	Т-05, среднее квадратическое отклонение погрешности измерителя момента трения — не более 1 %

Колебания результатов измерений, производимых в соответствии с той или иной методикой, могут быть связаны с влиянием так называемого «человеческого фактора» (например, квалификации персонала, участвующего в исследованиях), времени (дня, недели) испытаний, параметров используемого прибора, лаборатории, в которой производятся испытания. Наибольшая сложность заключается в том, что чаще всего все эти, а также и некоторые другие факторы действуют одновременно. В этом случае рекомендуется использовать рандомизацию и планирование экспериментальных исследований.

Кроме стандартных устройств и приборов, погрешности измерений имеют место и в не стандартном оборудовании, разрабатываемом для реализации конкретных методик испытаний материалов. Применительно к измерительной схеме, представленной на рис. 2.21,

таким устройством является трибодилатометр. Возможные источники погрешностей этого элемента измерительной схемы будут более подробно представлены в Главе 3 после рассмотрения его конструкции и принципа действия.

Тритестер также потенциально может являться источником погрешностей измерений. При этом следует различать, по меньшей мере, два возможных вида погрешностей. Во-первых, так называемые внутренние погрешности самого тритестера, связанные, например, с износом деталей силоизмерителя и подшипниковых опор, наводками в электрических цепях и др. Во-вторых, внешние погрешности измерений, которые могут инициироваться тритестером и оказывать негативное влияние на другие элементы измерительной схемы, например, трибодилатометр. Одним из источников таких погрешностей могут быть вибрации машины трения. В исключительных случаях, например, при совпадении рабочих частот колебательных систем трибодилатометра и тритестера, эти погрешности измерений могут иметь достаточно большую величину. Очевидно, что выше упомянутые частоты зависят от большого числа факторов: нагрузочно-скоростных режимов испытаний, вида материалов исследуемых пар трения, типа используемого смазочного материала и др.

Для оценки возможности влияния вибраций машины трения (СМТ-1) на работу трибодилатометра PCLW-01 были проведены специальные эксперименты. Контроль виброскоростей и виброперемещений осуществлялся при помощи виброметра ВИТ-1 в двух местах машины трения – на ее станине и в непосредственной близости от места установки трибодилатометра. Испытывались два типа пар трения вал–вкладыш, отличающиеся используемыми в их конструкциях материалами. Испытания проводились как в режиме трения без смазочного материала (сталь–бронза), так и при использовании для смазывания сопряжений дизельного топлива Л62 (сталь–резина). Режимы испытаний пар трения характеризовались нагрузками – до 0,5 МПа, скоростями – до 1,4 м/с и продолжительностью – до 7,2 кс.

Частота колебательного процесса рассчитывалась по формуле

$$f = \frac{1000\,v}{\pi h}, \qquad (2.8)$$

где v – виброскорость, мм/с; h – виброперемещение, мкм.

В зависимости от значений линейной скорости (частоты враще-

ния), использованной при испытаниях пар трения, виброскорость и виброперемещения изменялись по сложной зависимости. При скоростях до 0,8 м/с виброскорость и виброперемещение практически сохраняли постоянными свои значения, соответственно, от 0,60 до 0,85 мм/с и от 6 до 12 мкм. При повышении скорости испытаний пар трения (более 0,8 м/с) виброскорость и виброперемещение заметно увеличиваются и достигают при скорости 1,3 м/с значений около 3 мм/с и 62 мкм, соответственно. Следует отметить, что указанные вибропараметры практически не зависят от места установки вибродатчиков, вида испытаний и исследуемых материалов, контроля состояния машины на холостом ходу или под нагрузкой, наличия или отсутствия смазочной среды в зоне фрикционного контакта. Рассчитанные по выражению (2.8) значения частот колебаний находились в пределах от 5 до 35 Гц. Зависимость частоты колебаний от скорости испытания трибосопряжений имеет вид синусоидального затухающего процесса с максимумами при скоростях, равных 0,2, 0,7 и 1,2 м/с.

Проведенные эксперименты показали, что значения частот колебаний машины трения и частот колебаний линейных размеров трибосистем в процессе их испытаний отличаются на несколько порядков, т. е. вибрации машины трения не могут оказывать сколько-нибудь заметного влияния на результаты трибодилатометрических измерений.

Анализ модели измерительной схемы (рис. 2.21) позволяет оценить виды, величины и источники погрешностей измерений. Применительно к разработанным методикам оценки износа и дилатации трибосистем можно выделить следующие разновидности погрешностей: инструментальные и методические, основные и дополнительные, статические и динамические, систематические, прогрессирующие и случайные, градуировки средств измерений, абсолютные, относительные и приведенные погрешности. Информация об основных погрешностях трибодилатометрических измерений приведена в таблице 2.5.

Общей задачей предварительной обработки экспериментальных данных является исключение наблюдений, содержащих грубые погрешности, а также уменьшение влияния систематической составляющей погрешностей измерений.

Инструментальная систематическая погрешность обнаруживается поверкой рабочего средства измерений по образцовому, имеющему более высокую точность. Методическая систематическая погреш-

ность выявляется в результате исследования условий опыта. Типичным примером систематической погрешности трибодилатометра является погрешность от сдвига шкалы показывающего прибора усилителя сигналов индуктивного датчика. Погрешность устраняется корректором нулевого положения стрелки и юстированием положения шкалы.

Табл. 2.5. Виды и источники погрешностей трибодилатометрических измерений

Виды погрешностей	Источники погрешностей	Примечания
Инструментальная	Конструкция прибора	Указана в паспорте прибора
Методическая	Метод использования прибора	
Основная	Конструкция прибора	Оговорена в техдокументации для нормальных условий эксплуатации
Дополнительная	Измененные условия эксплуатации	Нормируется указанием коэффициентов влияния
Статическая		Не зависящая от скорости изменения измеряемой величины
Динамическая	Скорость изменения во времени измеряемой величины	
Систематическая	Неисправность прибора, некорректность используемых методик измерений	Не зависящая от времени испытаний. Метод учета — поверка прибора, введение корректирующих преобразователей
Прогрессирующая	Медленно изменяющийся во времени процесс	Метод учета — введение поправки в заданный момент времени
Случайная	Непредсказуемые факторы и процессы	Учет — использование теории вероятностей и математической статистики
Погрешность градуировки	Недостаточная точность средств измерений, используемых при градуировке	Погрешность образцовых средств измерений должна быть не более 1/3 погрешности градуируемых
Абсолютная	Абсолютная величина измеряемой величины, точность прибора	Разность между реальной и номинальной характеристиками Δ_x
Относительная	Величина диапазона измерений	$\gamma = \Delta_x / x \approx \Delta_y / y$, где x и y — текущие значения входной и выходной величин прибора
Приведенная		$\gamma_{пр} = \Delta_x / X_к = \Delta_y / Y_к$, где $X_к$ и $Y_к$ — протяженность диапазона изменения входной и выходной величин прибора

Для исключения систематических погрешностей могут быть использованы аналитические и экспериментальные методы. Аналитические методы предусматривают введение соответствующих поправок измерений. Экспериментальные – использование специальных методических разработок.

Оптимальными условиями для выполнения измерений будут такие, при которых не исключенные остатки систематических погрешностей θ, а также случайная составляющая результата измерения, определяющаяся значением $S_{\bar{x}}$, будут приблизительно равны между собой. Только в этом случае точность приборов и самого метода будут соответствовать тем условиям, в которых производятся измерения.

В том случае, когда рассматриваемая совокупность результатов наблюдений принадлежала к генеральной, распределенной по закону Гаусса, результаты трибодилатометрических измерений обычно представлялись в форме

$$x = A \pm \Delta A, \qquad (2.9)$$

где A – наиболее вероятное значение результата измерения ($A \approx \bar{x}$); ΔA – доверительная граница погрешности измерения (вероятность $\gamma = 95\ \%$).

Часто для упрощения представляемых графиков и таблиц результаты экспериментов приводились без доверительных границ погрешностей измерений. В этих случаях надежность (вероятность) измерений равнялась 95 %.

Если статистическая обработка показывала, что совокупность результатов наблюдений не подчинялась закону Гаусса, то результат измерения представлялся значениями x, S_x, n (измеренное значение, среднее квадратическое отклонение, число испытаний).

Проверка сходимости термоизносных характеристик и, соответственно, износа и дилатации узлов трения позволяет оценить получаемые результаты с точки зрения их объективности. При этом, очевидно, что чем сложнее условия испытания узлов трения (например, в условиях переменных скоростей или нагрузок), тем более вероятность возникновения значительных погрешностей измерений. На рис. 2.22 показаны термоизносные характеристики пяти независимых испытаний узлов трения скольжения сталь–бронза.

Экспериментальные данные по износу и дилатации испытанных узлов трения приведены в таблице 2.6. Внешняя форма характерис-

тик уже позволяет предположить достаточно хорошую сходимость результатов испытаний. Результаты статистической обработки экспериментальных данных (таблица 2.7) подтверждают правоту этого предположения.

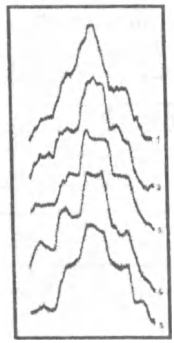


Рис. 2.22. Сходимость термоизносных характеристик сопряжений сталь (NC6) – бронза (B101); 1-5 – независимые испытания сопряжений; время работы на одной ступени – 0,72 кс; нагрузка – 150 Н; скорость – 0,06, 0,12, 0,18, 0,12, 0,06 м/с; трение без смазочного материала.

Табл. 2.6. Экспериментальные данные испытаний узлов трения скольжения сталь–бронза

Исследованный параметр, мкм	Результаты 5 независимых испытаний
Износ	9,45 10,60 12,35 10,95 10,80
Дилатация	20,90 19,45 17,57 19,75 18,90

Абсолютные значения эксцесса и асимметрии свидетельствуют, что обе выборки (износ и дилатация) имеют кривые распределения, весьма близкие к нормальной. Так как отношение выборочных коэффициентов асимметрии и эксцесса к их стандартным отклонениям значительно больше 3 (выполняются соотношения $|A/\delta_A| \le 3$ и $|E/\delta_E| \le 3$, где $\delta_A = \sqrt{S/n}$ и $\delta_E = \sqrt{24/n}$), то есть все основания принять гипотезу о том, что нормальный закон распределения удовлетворительно описывает исследуемые выборки.

С учетом значений среднего квадратического отклонения S и t-критерия Стьюдента из известной зависимости

$$n = \frac{t^2 S^2}{\delta^2_{\text{пред}}} \qquad (2.10)$$

может быть установлена связь между числом *n* и предельной погрешностью $\delta_{пред}$ измерений трибодилатометрических характеристик (рис. 2.23).

Табл. 2.7. Результаты статистической обработки данных по износу и дилатации сопряжений сталь–бронза

Статистический параметр	Износ, мкм	Дилатация, мкм
Среднее	10,83	19,314
Среднеквадратическое отклонение (*S*)	1,0348	1,2183
Эксцесс (*E*)	-0,5769	-0,8083
Среднеквадратическое отклонение ($\delta_{E,5}$)	0,75	0,75
Асимметрия (*A*)	0,2207	-0,2007
Среднеквадратическое отклонение ($\delta_{A,5}$)	0,707	0,707
Интервал	1,2865	1,5147
Минимум	9,45	17,57
Максимум	12,35	20,90
Минимальный объем выборки (P = 0,95 $\delta_{пред}$ = 1,0 мкм)	5	4

При этом, как следует из рис. 2.23, объем выборки существенно зависит также и от требуемого уровня значимости экспериментальных данных. Для наиболее часто используемого в исследовательской практике уровня значимости, имеющего значение 0,95, оптимальное число измерений равно 5 (табл. 2.7, рис. 2.23).



Рис. 2.23. Влияние предельной погрешности и уровня значимости измерений на объем выборки экспериментальных данных; 1-3 – уровни значимости 0,99 ($t_{a,n}$=4,0), 0,95 ($t_{a,n}$=2,5) и 0,90 ($t_{a,n}$=2,0), соответственно; S=1,0 мкм.

ГЛАВА 3. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗНАШИВАНИЯ И ДИЛАТАЦИИ ТРИБОСИСТЕМ

Создание оборудования для исследования изнашивания и дилатации трибосистем должно предусматривать анализ и систематизацию существующих технических средств и методов триботехнических испытаний, разработку высокоэффективных триботестеров, содержащих в своем составе устройства, позволяющие измерять линейные размеры испытываемых узлов трения.

3.1. Анализ и систематизация методов трибологических испытаний материалов

[931, 947, 960]

Одним из наиболее сложных вопросов в современной трибологии является оценка свойств конструкционных фрикционных, антифрикционных и смазочных материалов. Экспериментальные исследования проводят на машинах трения самых разнообразных типов, число которых уже с большим трудом поддается какому-либо учету и может составить сегодня многие сотни и даже тысячи наименований. В процессе создания триботехнических технологий и материалов, а также оценки возможности использования уже существующих в новых специфических условиях эксплуатации машин, как правило, возникает необходимость разработки новых исследовательских методов и устройств. Это является главной причиной осуществления ряда исследовательских программ, посвященных сопоставлению и унификации используемых в мировой практике методов испытаний материалов на трение и изнашивание. Примером такой программы является международный трибологический проект VAMAS (Versailles Project on Advanced Materials and Standarts). Проведенные в рамках этого проекта анализ и классификация методов испытания материалов на трение и изнашивание основывались на наиболее распространенных в международной практике исследовательских процедурах. Реализация систематизированных и предложенных методов испытаний позволила разработать в рамках этого проекта серию компьютеризированных триботестеров с устройствами для измерения износа и дилатации трибосистем.

При описании методов испытания материалов на трение и изна-

шивание использован системный подход Х. Чихоса [577], уже вошедший в стандарты и практику трибологических исследований. По сравнению с методологией Х. Чихоса, нами был более точно проведен анализ методов износных испытаний, в соответствии с которым все входы в трибологическую систему поделены на две категории – эксплуатационные параметры и помехи (рис. 3.1). Такое разделение позволяет в явном виде выделить влияние окружающей среды на трущиеся элементы системы. Входные эксплуатационные параметры системы образуют блок $\{X\}$, характеризуемый с помощью параметров движения и приложенных к узлу трения сил. Помехами $\{V\}$ являются все относящиеся к внешней среде факторы, оказывающие влияние на состояние элементов трибологической системы. Такими факторами, например, могут быть внешние источники тепла или абразивные частицы, попадающие в зону фрикционного контакта испытываемых материалов.



Рис. 3.1. Схема трибологической системы

Структура трибологической системы формально может быть представлена в виде:

$$S = \{A, P, R\}, \qquad (3.1)$$

где A – элементы рассматриваемой трибосистемы: $A = \{a_1, a_2, \ldots, a_n\}$, обладающие некоторыми свойствами $P = \{P(a_i)\}$ и взаимодействующие между собой $R = \{R(a_i, a_j)\}$.

Функция системы, представленной на рис. 3.1, состоит в преобразовании входных величин в выходные:

$$\{X,V\} \xrightarrow{L} \{Y,Z\}. \qquad (3.2)$$

Табл. 3.1. Стандартные методы испытаний определенного и неопределенного контактов трибосопряжений

Регистрируемые параметры	Вид контакта							
	Неопределенный	Определенный						
		Концентрированный				Распределенный		
		Линейный			Точечный			
	Абразив, волокна	Кулачок-толкатель	Зубчатые колеса	Подшипники качения	Шарикоподшипник	Гидравлические насосы и двигатели	Шарниры	Сцепления и тормоза
		Скольжение	Качение с проскальзыванием			Скольжение		
Износ	ASTM G65 ГОСТ 23.201, 23.207, 23.208, 23.219, 23.212	BN/0535-29*	ASTM D1947* DIN 51354* IP 166* IP 232* MIL-L-21-5*	DIN 51806*	ASTM D4170*	ASTM D2271* ASTM D2882*	ASTM D3428*	ASTM B526 ASTM B461*
Коэффициент трения	ГОСТ 23.223			ASTM D3527* DIN 51821*	ASTM D1741* ASTM D3336*		ASTM D3428*	
Температура	ГОСТ 23.223			DIN 51821*	ASTM 1741* ASTM D3336*			
Прочие	ГОСТ 23.223		DIN 51354*	DIN 51806* DIN 51821* MIL-L-28502*			ASTM D3428*	

Примечание. Звездочкой отмечены методы испытаний со смазочным материалом.

Если в качестве системы рассматривать устройство для испытания материалов на трение и износ, то следует отметить, что значения помех $\{V\}$ оказывают чрезвычайно большое влияние на воспроизводимость результатов испытаний. По этой причине в процессе трибологических тестов необходимо стремиться к полному устранению влияния факторов окружающей среды (например, путем очистки от пыли воздуха в помещении исследовательской лаборатории) либо осуществлять контроль этих факторов (например, путем измерения и регулировки относительной влажности воздуха, заметно влияющей на изнашивание сопряжений при трении без смазочного материала).

Анализ трибологических методов осуществляли с учетом результатов исследований Г. Хейнке, предложившего разделить все испытания на модельные и испытания элементов машин. Эксплуатационные испытания машин, а также испытания узлов машин на испытательных стендах трактуются нами как испытания элементов машин.

В модельных испытаниях, а также в случае испытания элементов машин, испытываемый контакт с геометрической точки зрения может быть определенным или неопределенным (таблица 3.1). Последний случай имеет место, когда элементы испытываемого сопряжения контактируют с дисперсной абразивной средой, например, частицами песка. Группа методов испытаний на абразивное изнашивание будет рассмотрена ниже отдельно. Модельные сопряжения, а также сопряжения элементов машин могут образовывать два основных типа контактов: контакт распределенный, например, контакт плоскости с плоскостью или выпуклой поверхности с вогнутой (при одинаковых параметрах кривизны поверхностей) и контакт концентрированный, например, точечный или линейный.

В концентрированном контакте может иметь место скольжение, качение, верчение или сочетание некоторых этих движений, например, качение с проскальзыванием. Для распределенного контакта единственно возможным видом движения является скольжение.

Кроме элементов, образующих испытываемое сопряжение, в проведенном системном анализе были учтены также промежуточный элемент (смазочный материал и т. п.) и окружающая среда (например, воздух, инертный газ, вакуум).

На первом этапе были подвергнуты анализу триботехнические методы исследований, описанные в технических нормах (стандартах): США (ASTM, MIL), Великобритании (BS, IP), Германии (DIN), Ита-

Табл. 3.2. Стандартные методы испытаний распределенного и концентрированного контактов трибосопряжений

Регистрирусмые параметры	Вид контакта						
	Концентрированный					Распределенный	
	Линейный		Точечный			Сопрягаемые поверхности	
						Неплоские	Плоские
	Качение с проскальзыванием	Скольжение	Качение	Качение с проскальзыванием	Скольжение	Скольжение	
Износ	PN/H-04329 04329*	PN/H-04308, 04329, 04332 SEB 181302 ASTM 2509* 2625* 2670* 2714* 2782* 2981* 3704* ASTM G77* ГОСТ 23.204* IP 240, 326*	IP 300* IP 305*		ASTM G83, D2596*, D2783* DIN 51350* ГОСТ 9.490* IP 239* PN/C-04147*	ASTM B460 BN/5410-11 PN/H-04329 04332 BS AU142 ГОСТ 23.215* 23.216*, 23.220* PN/H-04329* 04332*	ASTM D3702 BN/3612-21 ГОСТ 23.210, 23.211 ASTM F732* ГОСТ 23.211* 23.216*
Коэффициент трения	PN/H- 04329	ASTM 2509* 2714* 3233* 3704* ASTM G77* IP240* 326* PN/C-04073*	ГОСТ 23.221*	ГОСТ 23.202	ASTM D4172* G830* DIN 51350* ГОСТ 9.490* 23.202* 23.213* 23.221* 21.466* PN/C-04147*	ASTM B460 BN/5410-11 PN/H-04329, 04332 BS AU142 ГОСТ 23.215* 23.216* 23.222* PN/H-04329* 04332*	BN/3612-21 ГОСТ 23.210 ASTM F732* ГОСТ 23.211* 23.216*
Температура			ГОСТ 23.221*		ГОСТ 21.466* 23.221*	ГОСТ 23.215* 23.216* 23.222*	BN/3612-21 ГОСТ 23.210 23.216*
Прочие					ГОСТ 21.466* 23.213*	ГОСТ 23.215*	

Примечание. Звездочкой отмечены методы испытаний со смазочным материалом.

лии (FIAT), Польши (PN, BN), СНГ (ГОСТ).

Наиболее распространенные испытательные машины, а также методы исследования процессов трения и изнашивания (например, испытания на четырехшариковой машине трения) используются в нормах многих стран. Однако полное сопоставление результатов триботехнических тестов, осуществляемых в разных странах, практически невозможно вследствие несопоставимости условий испытаний. С нашей точки зрения это объясняется отсутствием единого методологического подхода к регламентации, контролю и управлению значениями входов трибологической системы.

Кроме нормализованных (стандартизированных) проанализированы также не включенные в нормы и стандарты методы испытания на трение и изнашивание. Всего было подвергнуто анализу 138 машин и стендов для исследования трибологических свойств материалов, причем большинство из них позволяло осуществлять, по меньшей мере, несколько разных тестов и методик. Основная часть рассмотренных методов испытаний, включенных в вышеупомянутые нормы и стандарты, представлена в табл. 3.1 и 3.2.

Некоторые определяемые во время испытаний параметры, например, износ, сила или момент трения, не требуют дополнительных обсуждений, чего нельзя сказать о температуре и некоторых других триботехнических характеристиках. Температура понимается нами как один из важнейших параметров, характеризующих трибологические процессы, так как является источником большей части потерь $\{Z\}$, а также помех $\{V\}$. Например, тепловое расширение трущихся элементов может быть причиной значительных погрешностей при непрерывной оценке линейного износа испытываемых сопряжений. В ряде случаев в процессе триботехнических тестов оценивают форму и количество частиц износа, фрикционные автоколебания узлов, фактическую площадь контакта взаимодействующих тел, толщину смазочного слоя и некоторые другие параметры. Нам представляется, что информативность трибологических испытаний может быть существенно увеличена путем более широкого применения в практике мониторинга акустических и электрических методов, а также новых методик, позволяющих осуществлять прецизионный контроль изнашивания тонких поверхностных слоев материалов.

Отдельные виды испытываемых контактов учтены стандартами и нормами только некоторых стран. Примером этому является метод исследования износа по PN-79/H-04329 (концентрированный линейный контакт при трении качения с проскальзыванием в при-

сутствии смазочного материала), который, однако, может быть реализован на широко используемой в мировой практике триботехнических испытаний машине трения Амслера. Некоторые другие важные и известные методы испытаний, например, на устройстве типа стержень–диск, до настоящего времени не стандартизированы.

На основе проведенного анализа разработана концепция системы трибологических испытаний, охватывающая наиболее важные с практической точки зрения типы трущихся сопряжений. Суть концепции заключается в научно-обоснованном предложении и создании достаточно ограниченного количества машин трения (триботестеров), позволяющих осуществлять реализацию методологии исследований, отвечающей современному состоянию техники и с учетом перспектив развития трибомониторинга. Разработанная система испытаний включает более 30 методик, позволяющих производить комплексный анализ исследуемых узлов трения. Используемые методики описываются при помощи специальных информационных карт. Образец такой карты, описывающей методику испытаний на четырехшариковой машине трения, представлен в табл. 3.3.

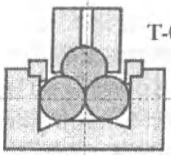
Табл. 3.3. Карта методики трибологических испытаний материалов

(Страница 1)

<table>
<tr><td colspan="2">ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДИКИ</td><td rowspan="2">СИСТЕМА ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ</td></tr>
<tr><td colspan="2">Методика испытаний смазочных материалов на четырехшариковой машине трения: определение величины износа и нагрузки сваривания</td></tr>
<tr><td colspan="2">Классификационный символ — SBT-1.2.1/1</td><td>SBT</td></tr>
<tr><td colspan="3">Область применения: оценка свойств жидких и пластичных смазочных материалов</td></tr>
<tr><td colspan="2">Вид контакта: точечный концентрированный</td><td>Вид движения: скольжение</td></tr>
<tr><td colspan="3">Принципы испытаний: определение величины износа и нагрузки сваривания осуществляется при заданных постоянных условиях теста в течение 10 с в присутствии испытываемого смазочного материала и ступенчатом увеличении нагрузки в последующих тестах, вплоть до сваривания шариков; построение графика зависимости значения среднего диаметра пятна износа от установленной нагрузки; расчет величины износа испытанного узла</td></tr>
<tr><td>Измеряемые параметры</td><td colspan="2">Способ измерения</td></tr>
<tr><td>Износ</td><td colspan="2">Методом оценки линейного размера пятна износа с точностью 0,01 мм в направлении, параллельном и перпендикулярном по отношению к следам трения</td></tr>
<tr><td>Сопротивление движению</td><td colspan="2">Непрерывное измерение и регистрация момента (силы) трения</td></tr>
<tr><td>Температура</td><td colspan="2">Не измеряется</td></tr>
<tr><td>Прочие</td><td colspan="2">Не измеряются</td></tr>
</table>

(Страница 2)

Схема узла трения:



Т-02

Оборудование: четырехшариковая машина трения	
Параметры испытаний	
Нагрузка	Постоянная в процессе 10-ти секундного теста и ступенчато увеличивающаяся в каждом последующем тесте, вплоть до сваривания шариков (в соответствии со стандартом)
Скорость	Постоянная в процессе всего теста — 1450 об/мин
Температура	Начальная — 293 К
Прочие	Время испытаний — 10 с
Метод смазывания	Смазывание погружением

Примечание. Методика соответствует PN-76/C-04147.

Табл. 3.4. Система методов трибологических испытаний материалов

Метод испытаний SBT	Испытательное оборудование		Стандарты	Измеряемые величины	
				Трение со смазочным материалом	Трение без смазочного материала
1.1.0/1	Тестер типа диск–стержень	Т-01	—	I, F	I, F
1.1.0/2	Тестер типа плоскость–кольцо	—	ГОСТ 23.210	—	I, F
1.1.0/3	Тестер Optimol-SRV	—	—	I, F	I, F
1.1.0/4	Стенд инерционный	—	BN-81/3612-21	—	I, F, T
1.1.0/5	Стенд инерционный	—	BN-81/3612-21	—	I, F, T
1.1.0/6	Тестер типа вал–вкладыш	Т-08	PN-82/H-04332	I, F, T, P	I, F
1.1.0/7	Тестер типа вал–вкладыш	Т-08	—	I, F, T, P	I, F
1.2.1/1	Четырехшариковая машина трения	Т-02	ASTM D2596 DIN 51350 ГОСТ 9.490 PN-76/H-04147	I, F	—
1.2.1/2	Четырехшариковая машина трения	Т-02	ASTM D2596 DIN 51350 ГОСТ 9.490 PN-76/H-04147	I, F	—

Продолжение табл. 3.4.

Метод испытаний SBT	Испытательное оборудование		Стандарты	Измеряемые величины	
				Трение со смазочным материалом	Трение без смазочного материала
1.2.1/3	Четырехшариковая машина трения	T-02	ASTM D2596 DIN 51350 ГОСТ 9.490 PN-76/H-04147	I, F	—
1.2.1/4	Тестер типа 3 цилиндра–конус	T-03	PN-83/H-04302	I,F	I, F
1.2.1/5	Тестер типа 3 цилиндра–конус	T-03	PN-83/H-04302	I, F	I, F
1.2.1/6	Тестер типа вал–вкладыш	T-08	—	I, F, T, P	I, P
1.2.1/7	Четырехшариковая машина трения	T-04	IP 300/82	I, F, P	—
1.2.1/8	Тестер для усталостных испытаний подшипников	T-06	IP 309/79	I, F, P	—
1.2.2/1	Тестер типа Falex	T-09	ASTM D2625, D2670, PN-75/M-04308	I, F, P	I, F, P
1.2.2/2	Тестер типа вал–вкладыш	T-08	—	I, F, T, P	I, F
1.2.2/3	Тестер типа вал–вкладыш	T-08	—	I, F, T, P	I, F
1.2.2/4	Тестер типа вал–вкладыш	T-05	ASTM D3704	I, P	—
1.2.2/5	Тестер типа вал–вкладыш	T-05	ASTM D2971	—	I, F, P
1.2.2/6	Машина трения типа Amsler	—	PN-79/H-04329	I, F, P	I, F, P
1.2.2/7	Тестер типа вал–вкладыш	T-08	—	I, P	—
2.1.0/1	Устройство для испытания фрикционных материалов	—	ASTM B526	—	I, F, T
2.1.0/2	Устройство для испытания фрикционных материалов	—	ASTM B461	I, F, T	I, F, T
2.1.0/3	Устройство для испытания шарнирных соединений	—	ASTM D3428	I, F, T	—
2.1.0/4	Стенд испытательный Викерса	—	ASTM D2882	I, T	—
2.2.1/1	Стенд для испытания подшипников скольжения	—	DIN 51821	I, T	—
2.2.2/1	Тестер типа кулачок–толкатель	—	BN-76/0535-29	I, T	—
2.2.2/2	Стенд FZG	—	DIN 51354 PN-78/C-04169	I, T, P	—
3.1.0/1	Тестер для испытания материалов на абразивное изнашивание	T-07	ГОСТ 23.208	—	—

Все методики исследований в разработанной системе представляются в форме:

$$SBT - A.B.C/D, \tag{3.3}$$

где *SBT* – сокращенное название системы трибологических испытаний; *A* – тип испытываемого трибосопряжения (1 – сопряжение модельное; 2 – сопряжение элементов машин; 3 – сопряжение геометрически неопределенное); *B, C* – тип геометрии контакта (1.0 – контакт распределенный, 2.1 – контакт концентрированный точечный, 2.2 – контакт концентрированный линейный); *D* – порядковый номер методики исследований в данной группе.

Исследовательские методы в *SBT* (табл. 3.4) охватывают также виды испытаний, не предусмотренные проанализированными нормами и стандартами. Многие из методов, включенных в *SBT*, были впоследствии модифицированы и унифицированы, например, из 12 обязательных для использования в Польской Республике стандартных методик трибологических испытаний только 3 были оставлены практически без изменений.

3.2. Триботестеры

[931, 947, 960]

Кроме методов трибологических испытаний в табл. 3.4 представлены также и соответствующие этим методам устройства для исследований материалов на трение и изнашивание. Устройства, обозначенные в табл. 3.4 символами Т, были сконструированы в Департаменте трибологии и серийно выпускаются опытно-промышленным производством Института технологии эксплуатации (г. Радом, Польская Республика). Эти триботестеры по целому ряду конструкционных признаков отличаются от своих аналогов, однако реализуют те же самые типы испытываемых сопряжений. Схематическое изображение узлов трения триботестеров серии «Т» представлено на рис. 3.2.

Тестер Т-01 представляет собой устройство типа стержень–диск с тремя одновременно испытываемыми пальчиковыми образцами, предназначенное для определения триботехнических характеристик конструкционных материалов, а также различного рода покрытий на поверхностях трущихся элементов машин.

На тестере Т-01 можно проводить исследования в соответствии со стандартами:

- **ASTM G-99** *Wear Tests on Pin–on–Disk Apparatus*;

• **DIN 50324** *Prufüng von Reibung und Verschleiß. Modellversuche bei Festkörpergleitreibung (Kugel–Scheibe–Prüfsystem).*

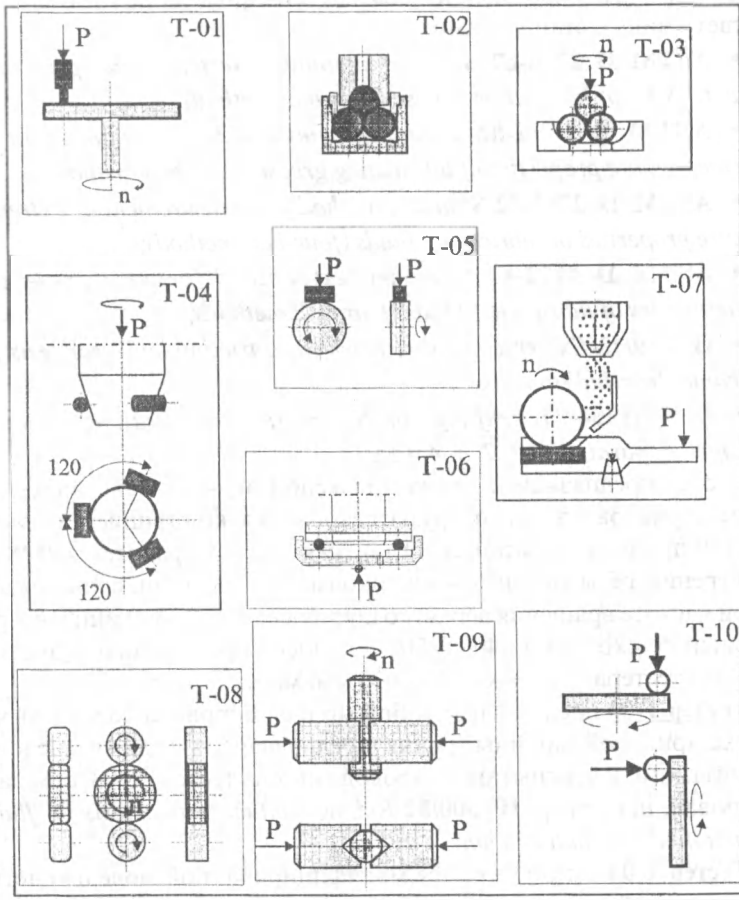


Рис. 3.2. Схемы узлов трения машин для трибологических испытаний материалов (триботестеры серии «Т»)

Усовершенствованная модель тестера (Т-01М) позволяет производить испытания с одним образцом (стержень или шарик) при скорости скольжения от 0,1 до 3,0 м/с и давлении до 50 МПа как в условиях трения без смазочного материала, так и при его наличии. Максимальные диаметры используемых стержня и диска, соответственно, 5 и 120 мм. Размеры устройства: 520 х 460 х 310 мм, масса – 50 кг.

Тестер Т-02 – четырехшариковая машина трения имеет испытываемый узел, схематически представленный на рис. 3.2.

Тестер Т-02 может использоваться для проведения испытаний в соответствии со стандартами:

- **ASTM D 2266-67** *Standart method of test for wear preventive characteristics of lubricating grease (four-ball method)*;
- **ASTM D 2596-82** *Standart method for measurement of extremepressure properties of lubricating grease (four-ball method)*;
- **ASTM D 2783-82** *Standart method for measurement of extreme-pressure properties of lubricating fluids (four-ball method)*;
- **ASTM D 4172-82** *Standart test method for wear preventive characteristics of lubricating fluids (four-ball method)*;
- **IP 239/73** *Extreme pressure properties: friction and wear tests for lubricants: four-ball-machine*;
- **DIN 51350-77** *Prüfung von Schmierstoffen. Prüfung in Shell-Verkugel-Apparat. Teil 1, 2, 3, 4* и др.

Тестер предназначен для комплексной оценки свойств смазочных материалов (износа, нагрузки сваривания, коэффициента износа и др.). В процессе испытаний контактная нагрузка равняется 7848 Н. Узел трения, образованный 4 шариковыми образцами, испытывается при частоте вращения верхнего шарика от 10 до 1800 мин$^{-1}$, возрастающей со скоростью 408,8 Н/с до своего предельного значения. Размеры тестера – 1780 х 1940 х 620 мм, масса – около 90 кг.

Тестер Т-03 представляет собой модифицированную модель четырехшариковой машины трения, предназначенную для исследования питтинга. Ряд испытаний, проводимых на тестере Т-03, стандартизирован, например, **IP 300/82** *Rolling contact fatigue tests for fluids in a modified four-ball machine.*

Тестер Т-04 также является модифицированной моделью четырехшариковой машины со схемой узла трения 3 цилиндра–конус. Устройство служит для исследования триботехнических свойств смазочных и конструкционных материалов при частоте вращения от 50 до 3200 мин$^{-1}$ и нагрузке до 3,1 кН. Габариты тестера – 620 х 1100 х 1700 мм, масса – около 165 кг, потребляемая мощность – 1,5 кВт.

Машина трения Т-05 является универсальным устройством, позволяющим исследовать трибологические характеристики жидких, пластичных и твердых смазочных материалов, разнообразных металлов и их сплавов, полимерных композитов, керамических покрытий и т. д.

Тестер Т-05 позволяет проводить испытания в соответствии со стандартами:

- **ASTM D 2714** *Calibration and operation of the Alpha Model LFW-1 Friction and Wear Testing Machine*;
- **ASTM G 77** *Ranking resistance of materials to sliding wear using block-on-ring wear test*;
- **ASTM D 2981** *Wear life solid film lubricants in oscillating motion;*
- **ASTM D 3704** *Wear preventive properties of lubricating greases using the Ring and Block Test Machine in oscillating motion.*

Испытания могут проводиться в условиях как обычного (одностороннего), так и реверсивного движения узлов трения. При одностороннем движении (вращении) линейная скорость может изменяться от 0,037 до 5,5 м/с. Частота колебаний при реверсивном трении составляет от 40 до 500 циклов в минуту при угле осцилляции до 90 град. Нагрузка в испытываемом сопряжении может принимать значения от 150 до 3150 Н. Габариты машины трения – 680х500х350 мм, масса – около 155 кг, потребляемая мощность – 1,5 кВт.

Устройство Т-06 предназначено для исследования усталостного изнашивания (питтинга) материалов в соответствии со стандартом **IP 305** *The assesment of lubricants by measurement of their effect on the rolling fatigue resistance of bearing steel.* Тестер Т-06 предназначен для проведения испытаний, аналогичных проводимым на модифицированной четырехшариковой машине трения, однако имеет несколько другую геометрию исследуемого сопряжения (вал–плоскость). Это позволяет приблизить лабораторные испытания к реальным условиям работы подшипников качения. Узел трения составляют элементы шарикового подшипника качения и обойма из испытуемого материала. Исследования проводят при частоте вращения 1500 мин$^{-1}$ и нагрузке 3340 Н. Габариты устройства – 300 х 350 х 500 мм, масса – около 55 кг.

Испытательное устройство Т-07 служит для экспериментальной оценки износостойкости материалов в условиях абразивного изнашивания. Испытания проводят в соответствии с **ГОСТ 23.208** *Обеспечение износостойкости изделий.*

Абразивная среда (например, корунд) подается в зону трения гуммированного стального ролика с испытываемым металлическим образцом, имеющим форму пластины с размерами 30 х 30 х 3 мм. Испытания проводятся при нагрузке 22 (приработка) или 44 Н (испытания). Габариты устройства – 310 х 260 х 430 мм, масса – око-

ло 20 кг.

Тестер Т-08 предназначен для оценки триботехнических свойств смазочных материалов, а также материалов, используемых в высоконагруженных узлах трения, включая различные виды покрытий. Конструкция тестера обеспечивает возможность проведения испытаний как узлов трения скольжения, так и качения при линейной скорости ведущего ролика до 10 м/с, давлении до 1,5 ГПа для линейного и до 5 ГПа для точечного контакта элементов исследуемого сопряжения. Габариты тестера – 450 х 500 х 275 мм, масса – около 50 кг.

Тестер Т-09 разработан для оценки свойств пластичных и жидких смазочных составов, а также композиционных материалов, предназначенных для использования в узлах трения скольжения. Тестер имеет испытываемое сопряжение типа вал–призма и предназначен для проведения испытаний в соответствии со следующими нормами и стандартами:

- **PN-75/M-04308** *Badanie odporności na zużycie przez tarcie na maszynie Falex;*
- **ASTM D 2625** *Standard test method for endurance (wear) life and load-carrying capacity of solid film lubricants (Falex method);*
- **ASTM D 2670** *Standard methods for measuring wear properties of fluid lubricants (Falex pin and wee block method);*
- **ASTM D 3233** *Standard methods for measurement of extreme pressure properties of fluid lubricants (Falex method).*

Испытания проводятся при нагрузках до 20 кН и скорости скольжения 0,095 м/с. Габариты тестера – 600 х 350 х 250 мм, масса – около 35 кг.

Тестер Т-10 предназначен для оценки трибологических характеристик металлов, а также разнообразных органических и неорганических покрытий по схеме шарик (стержень) –диск.

Тестер позволяет проводить испытания в соответствии со стандартами:

- **ASTM G-99** *Wear Tests on Pin-on-Disk Apparatus;*
- **DIN 50324** *Prüfung von Reibung und Verschleiß. Modellversuche bei Festkörpergleitreibung (Kugel-Scheibe-Prufsystem).*

Вид контакта – концентрированный точечный (шарик) или распределенный (стержень). Диаметры диска – до 60 мм, шарина – 9,525 или 10 и стержня – от 3 до 8 мм. Сопряжения могут испытываться при линейной скорости до 2 м/с, нагрузке 100 Н в случае вертикального или горизонтального расположения поверхности диска. В про-

цессе исследований осуществляется измерение температуры контробразца (шарика, стержня), величины нагрузки, силы трения и линейного износа испытываемого узла. Габариты тестера – 300 х 460 х 600 мм, масса – около 30 кг.

Во всех типах представленного оборудования для триботехнических испытаний материалов в приводах регулирования частоты вращения (скорости) использованы асинхронные электродвигатели с разработанным в Институте технологии эксплуатации электронным управляющим блоком. Все тестеры оснащены универсальной микропроцессорной системой управления, выполненной по модульному принципу и позволяющей автоматизировать процесс триботехнических испытаний. Использование микропроцессорной системы позволяет производить тщательный контроль всех функций тестера, осуществлять прецизионное управление значениями всех входящих в исследуемую трибосистему величин, надежную регистрацию, статистическую обработку и наглядное графическое представление результатов исследований.

3.3. Трибодилатометры

[925, 927, 928, 930, 939, 946, 947, 958, 959, 963, 976]
Стадия технической реализации методик измерений, о которой уже говорилось ранее при разработке методологических основ трибодилатометрии (глава 2), предусматривает разработку специальных приборов – трибодилатометров, позволяющих с высокой точностью осуществлять оценку значений износа и дилатации трибосистем.

Разработанное нами устройство, схематически изображенное на рис. 3.3, обладает рядом уникальных технических возможностей, в совокупности обеспечивающих реализацию на практике всех разработанных методик дилатометрических измерений.

Устройство содержит корпус 1, закрепленный на жестком неподвижном основании 2, являющимся базовой поверхностью для его монтажа на машине трения. На корпусе установлен основной блок 3 прибора, в котором расположен механизм, состоящий из пружины 4, втулок 5, 6, 7, 8 и уплотнительного элемента 9 для фиксации и перемещения вдоль оси датчика износа 10. Блок 3 выполнен в виде полого цилиндра, имеющего на поверхности ряд технологических отверстий, предназначенных, например, для смазывания и установки деталей, необходимых для оптимизации его работы. С этой же целью целесообразно изготавливать втулку 6 и уплотнительный элемент 9 из антифрикционного полимера, например, композиционно-

го фторопласта. Отличительной особенностью металлических втулок 5, 7, 8 является их связь между собой и с блоком 3 при помощи специальных резьбовых соединений с небольшим шагом. Это позволяет облегчить процесс настройки и регулировки трибодилатометра. Датчик 10 может быть выполнен на основе индуктивных или оптических систем, прецизионных механических устройств, например, индикаторов часового типа и др. В экспериментах применялся индуктивный измеритель линейных перемещений, соединенный через усилитель 11 с регистратором 12 и/или компьютером 13, служащими для записи, обработки и хранения исследовательской информации. В блоке 3 при помощи фрикционной системы 14 закреплен основной стержень 15, который своей верхней опорной поверхностью контактирует с чувствительной частью датчика износа 10, а нижней – сопряжен с узлом настройки измерительной схемы 16. В нижней части узла 16 установлен регулируемый упор 17, служащий для установки рабочих зазоров между боковым упором дополнительного стержня 23 и контактной рабочей поверхностью основного стержня 15, с одной стороны, и аналогичной поверхностью упора 17 – с другой стороны. Механическая фрикционная система (фрикцион) 14 состоит из винта, упругого элемента, например, пружины или эластичной пластмассы и непосредственно контактирующего с основным стержнем 15 фрикционного элемента. Для устранения возможности осевого поворота узла 16 на боковых поверхностях, прилегающих к плоскому участку 18, выполнены две симметричные плоскости 19, которые контактируют с установленными в корпусе 1 регулируемыми упорами 20. Стабильность этого контакта обеспечивается тем, что оси упоров 20 параллельны плоскому участку 18 боковой поверхности узла 16 и перпендикулярны оси основного стержня 15. С целью повышения надежности работы измерительной схемы трибодилатометра на внутренней поверхности корпуса 1, симметрично его оси, и на противолежащем участке боковой поверхности втулки узла 16 выполнены пазы 21, в которых размещаются центрирующие элементы 22. Для изготовления элементов 22 могут быть применены самые разнообразные антифрикционные материалы: металлы, керамика, пластмассы и др. Они могут иметь также форму тел скольжения или качения. Возможно комбинированное сочетание материалов и форм центрирующих элементов 22. С узлом настройки измерительной схемы 16 непосредственно контактирует боковой упор дополнительного стержня 23, размещенного посредством вспомогательной фрикционной системы 24 в держателе 25. Размещение дополни-

тельного стержня 23 в держателе 25 испытываемого образца 27 значительно упрощает процесс настройки и эксплуатации информационной цепи трибодилатометра, например, в случае замены одного из элементов, расположенных между испытываемой трибосистемой с одной стороны, и компьютером – с другой стороны. Кроме того, при этом существенно облегчается установка и регулировка рабочих зазоров (δ) в узле настройки измерительной схемы 16, особенно при оценке больших величин износа сопряжений. Держатель 25 может быть выполнен в виде одного или нескольких связанных между собой элементов, служащих для нагружения узла трения 26, состоящего из образца 27 (вкладыша) и контртела 28 (вала), и передачи информации об износе и дилатации испытываемой трибосистемы.

Работа трибодилатометра осуществляется следующим образом. При вращении контртела 28, входящего в испытываемую трибосистему 26, перемещения, обусловленные ее износом, деформацией, дилатацией, а также радиальными биениями передаются посредством держателя образца 25 и бокового упора дополнительного стержня 23 на узел настройки измерительной схемы 16. Настройка узла 16 предусматривает установку оптимальной для данных условий испытаний величины зазора δ. При величине зазора δ несколько меньшей максимальной амплитуды радиальных биений происходит практически полное устранение их негативного влияния на измеряемые величины дилатации и износа трибосистем. Физическая сторона обеспечения работоспособности прибора заключается в суммировании двух колебательных процессов, имеющих сдвиг по фазе около 90°. Перемещения верхней опорной поверхности основного стержня 15 фиксируются при помощи датчика износа 10, записываются регистратором 12, обрабатываются, анализируются и сохраняются компьютером 13.

Более чем 5-летний опыт интенсивной эксплуатации трибодилатометров модели PCLW-01 позволил установить некоторые причины возникновения погрешностей измерений, обусловленных конструкцией измерительного устройства. В первую очередь, к ним следует отнести износ трущихся деталей трибодилатометра и пластическую деформацию (смятие) контактных поверхностей, работающих в условиях ударных нагрузок. Наибольшему износу подвержен основной стержень, а пластической деформации – боковой упор дополнительного стержня и контактирующие с ним поверхности основного стержня и регулируемого упора. В ряде последующих модификаций трибодилатометра PCLW-01 эти недостатки были в значительной степени устранены.

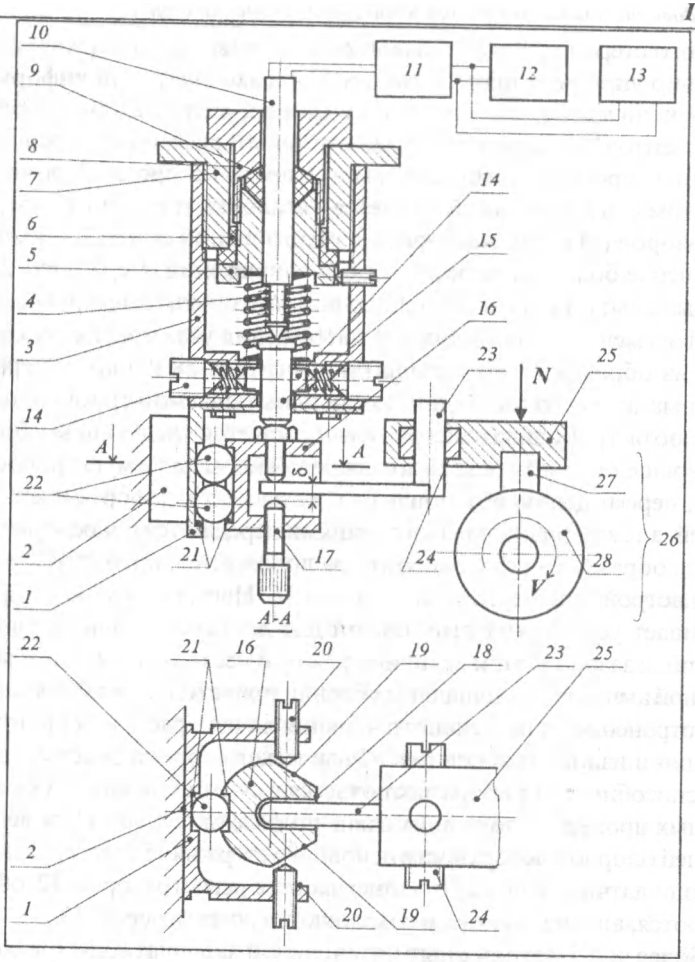


Рис. 3.3. Схема трибодилатометра модели PCLW – 01: *1* – корпус; *2* – жесткое неподвижное основание; *3* – основной блок; *4* – пружина; *5, 6, 7, 8* – втулки; *9* – уплотнительный элемент; *10* –датчик износа; *11* – усилитель; *12* – регистратор; *13* – компьютер; *14, 24* – фрикционные системы; *15* – основной стержень; *16* – узел настройки измерительной схемы; *17* – регулируемый упор; *18, 19* – плоские участки; *20* – упор; *21* – пазы; *22* – фрикционные элементы; *23* – дополнительный стержень с боковым упором; *25* – держатель; *26* – испытываемый узел трения; *27* – образец; *28* – контртело.

Технические характеристики трибодилатометра PCLW-01

Типы используемых датчиков линейных перемещений:	- индуктивные, - механические, - оптические и др.
Технологическая совместимость с триботестерами:	практически не ограничена
Точность измерений, мкм:	0,18 0,44 1,8 4,4 (на 2,5 мм шкалы регистрирующего устройства)
Количество информативных параметров:	не менее 3
Питание — напряжение, В:	220
Габаритные размеры (без индуктивного датчика), мм:	170 x 45 x 50
Масса, г:	около 300

В целом можно отметить, что трибодилатометр представляет собой прибор, содержащий в своем составе несколько функциональных блоков, каждый из которых для оптимального использования подлежит настройке и периодическим регулировкам. К числу таких главных функциональных блоков могут быть отнесены: основной блок, фрикционные элементы и узел настройки измерительной схемы. Следует отметить, что настройка функциональных блоков представляет собой непростую задачу, так как очень часто в значительной степени зависит от режимов, например, скоростных, испытаний трибосистем.

Основной блок и входящие в его состав конструкционные элементы используются для калибровки измерительных и регистрирующих приборов. Точность выполнения этой операции во многом определяет погрешность результатов измерений износа и дилатации узлов трения. Использование в комплекте с трибодилатометром PCLW-01 прибора показывающего с индуктивными преобразователями модели 275 позволяет регистрировать трибодилатометричес-

кие характеристики с достаточно высокой точностью. При этом точность измерений зависит от диапазона шкалы усилителя измерительного прибора (рис. 3.4).



Рис. 3.4. Градуировочный график регистрирующего устройства

При настройке трибодилатометра для испытаний конкретных узлов трения необходимо установить оптимальные силы затяжки фрикционов 11, 12 и величину рабочего зазора δ узла настройки измерительной схемы прибора. Значения регулировочных параметров этих блоков можно рассчитать, воспользовавшись упрощенной схемой трибодилатометра, приведенной на рис. 3.5.

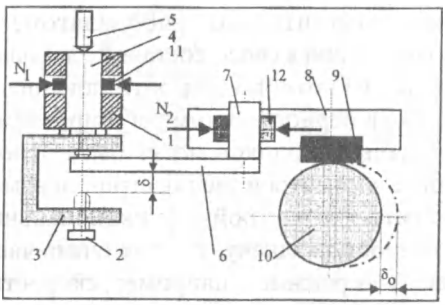


Рис. 3.5. Упрощенная схема трибодилатометра PCLW – 01: 1 – корпус; 2 – упор регулируемый; 3 – скоба боковая (элемент узла настройки измерительной схемы); 4 – стержень основной; 5 – датчик перемещений; 6 – упор боковой; 7 – стержень дополнительный; 8 – держатель; 9 – образец (вкладыш); 10 – контртело (вал); 11, 12 – фрикционные системы.

Информация об износе и дилатации испытываемой трибосистемы передается по цепи, включающей в себя следующие конструкци-

онные элементы: исследуемый узел трения (9, 10), держатель образца (8), стержень (7) с боковым упором (6), основной стержень (4), датчик линейных перемещений (5), усилитель, регистратор, компьютер (на схеме не показаны).

Сила затяжки фрикциона 11 должна быть такой, чтобы перемещение деталей 6, 7, 8, 9 не продолжалось после прекращения действия на них бокового упора 6 (такое движение возможно при движении упора вниз).

Если пренебречь величиной смятия тел 2, 4, 6, то уравнение движения узла настройки может быть представлено в виде

$$m_1 a = F_{\text{уп}} + m_1 g - F_{\text{TP1}}, \tag{3.4}$$

где m_1 – масса узла настройки; для прибора PCLW-01 $m_1 = 0{,}126$ кг; a – ускорения точек узла настройки; $F_{\text{уп}}$ – сила взаимодействия между упором 6 и винтом 2; F_{TP1} – суммарная сила трения между фрикционами 11 и стержнем 4.

При отсутствии относительного перемещения деталей 12 и 7 закон движения точки контакта тел 9, 10 может быть записан в виде

$$y = \frac{\delta_0}{2} \sin \omega t,$$

где δ_0 – величина радиального биения деталей трибосистемы; ω – угловая скорость контртела.

Так как

$$a = \ddot{y} = -\frac{\delta_0 \omega^2}{2} \sin \omega t, \tag{3.5}$$

то из (3.4) следует:

$$F_{\text{TP1}} = F_{\text{уп}} + m_1 g + m_1 \frac{\delta_0 \omega^2}{2} \sin \omega t. \tag{3.6}$$

Минимальное расчетное значение силы трения соответствует моменту отделения деталей друг от друга, при котором $F_{\text{уп}} = 0$ и $\sin \omega t = 1$:

$$F_{\text{TP1min}} = m_1 \left\{ g + \frac{\delta_0 \omega^2}{2} \right\}. \tag{3.7}$$

Для определения оптимальных значений рабочего зазора δ и сил затяжки фрикционов 12 рассматриваем совместный ход упора и узла настройки вверх. Уравнение движения тел 2, 3 (узла настройки) приобретает вид

$$m_1 a = F_k - F_{TP1min} - m_1 g. \tag{3.8}$$

Динамические эффекты, вызванные ударом упора 6 о нижнюю часть стержня 4, могут быть определены с учетом степени деформирования тел в области контакта. При скоростях удара, меньших 1 м/с, с большой степенью точности можно считать, что контактная сила подчиняется закону Герца

$$F_k = k\alpha^{1,5}, \tag{3.9}$$

где α – величина смятия тел; k – коэффициент, величина которого определяется упругими свойствами и формой соприкасающихся поверхностей.

В случае соприкосновения сферической поверхности радиуса R с плоскостью коэффициент k вычисляется по формуле:

$$k = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \frac{\sqrt{2R}}{3}, \tag{3.10}$$

где E – модуль упругости первого рода; ν – коэффициент Пуассона; R – радиус закругления нижнего конца основного стержня.

В данном случае смятие определяется как разность между вертикальными координатами точек упора и стержня узла настройки:

$$\alpha = \frac{\delta_0}{2}\sin\omega t - y, \tag{3.11}$$

где y — закон движения точек стержня.

Тогда уравнение (3.8) приобретает вид

$$m_1 \ddot{y} = k\left\{\frac{\delta_0}{2}\sin\omega t - y\right\}^{1,5} - F_{TP1min} - m_1 g. \tag{3.12}$$

Полученное нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка не имеет аналитического решения. Поэтому расчет закона изменения контактной силы и величины смещения y вы-

полнены методом Рунге–Кутта на ЭВМ. При записи начальных условий задачи учитывалось, что движение стержня 4 начинается с момента, при котором $F_k > F_{TP1} + m_1 g$.

Имея максимальное значение силы F_k, можно определить минимальную силу трения на фрикционах 12 при условии отсутствия относительного перемещения деталей 7 и 12:

$$F_{TP2min} = F_{kmax} + m_2 g, \tag{3.13}$$

где m_2 — суммарная масса деталей 4, 5.

Силы затяжки каждого из фрикционов теперь могут быть определены по формуле:

$$N_i = \frac{F_{TPimin}}{2f}, \tag{3.14}$$

где f — коэффициент трения скольжения между фрикционами и стержнями.

Анализ формул (3.7 и 3.14) показывает, что для величин биения $\delta_0 < 200$ мкм и коэффициента трения, равного 0,2, сила затяжки фрикционов 11 имеет значение $N = 3{,}0$ Н.

Полученные результаты позволяют выработать следующие рекомендации. Величина рабочего зазора узла настройки δ обязательно должна быть несколько меньше радиального биения δ_0, ибо, в противном случае, временной период роста силы в контакте завершается, не достигнув своего минимального значения, необходимого для начала движения.

Для практического применения приведенных расчетов удобно ввести величину $r = \delta_0 - \delta$, которая выбирается из ряда 5, 10, 15, 20 мкм. Вначале пользователь задается минимальным значением из этого ряда. Для данного значения по графику (пример которого для $r =$ 10 мкм приведен на рис. 3.6), в зависимости от ω и δ_0, определяется сила затяжки N_2 фрикционов 12. В случае, если ω изменяется во времени, то для определения N_2 выбирается максимальная величина ω.

Если же окажется, что точка, соответствующая заданным значениям ω и δ_0, лежит под крайней левой кривой (она определяет минимальное допустимое значение силы), то из размерного ряда выбирается следующее значение r и расчет повторяется до тех пор, пока N_2 не окажется выше упомянутой линии. Как правило, это условие выполняется уже при $r = 10$ мкм. Далее, для подготовки к работе прибор настраивается в соответствии с выбранными значениями N_1, N_2

и $\delta = \delta_0 - r$. С учетом вышеизложенных рекомендаций, для пользователя составлена блок-схема определения параметров настройки трибодилатометра PCLW-01 (рис. 3.7).

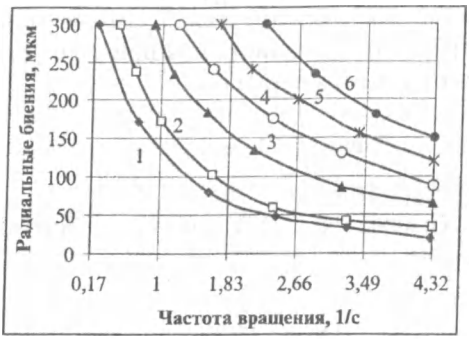


Рис. 3.6. Величина силы затяжки фрикционов в зависимости от частоты вращения контртела ω и величины радиальных биений δ_0: 1 – 7,5, 2 – 8,0, 3 – 9,0, 4 – 10,0, 5, – 11,0, 6 – 12,0 Н при r=10 мкм

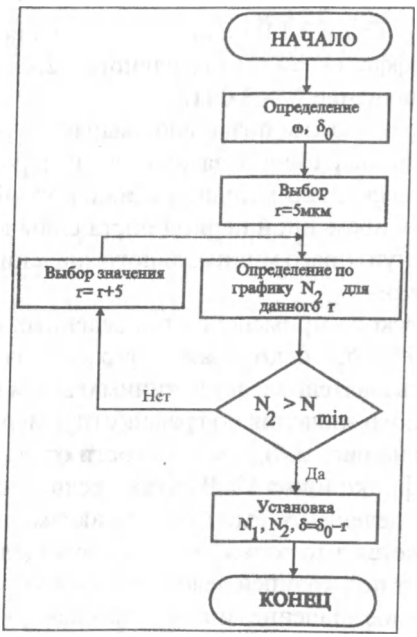


Рис. 3.7. Блок-схема определения параметров настройки трибодилатометра PCLW – 01

По результатам расчетов проведена экспериментальная проверка работоспособности прибора на парах трения скольжения сталь–сталь, сталь–бронза. Параллельно для сравнения произведены измерения износа трибосопряжений известным методом по стандарту ASTM G77. Поле рассеяния результатов экспериментов составляет 2,0 мкм (рис. 3.8). Исследования подтвердили работоспособность конструкции трибодилатометра, а также правильность предложенных методов его настройки и использованных методик измерений.

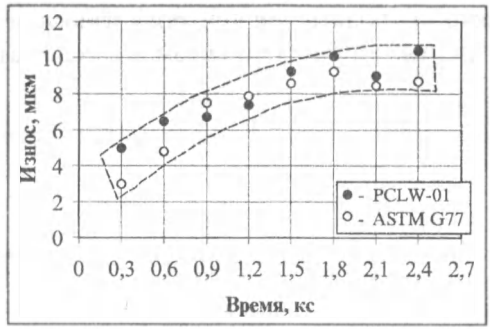


Рис. 3.8. Влияние времени испытаний на линейный износ сопряжений вал-вкладыш, измеренный при помощи трибодилатометра PCLW – 01 и по следу изнашивания на поверхности образца в соответствии со стандартом ASTM G77. Вал и вкладыш (куб со стороной 7 мм) – сталь ШХ – 15, нагрузка – 750 Н, скорость – 0,4 м/с, смазка – окунание вала в ванну с дизельным топливом Л62 (ГОСТ 305 – 82).

Точность измерений трибодилатометра PCLW-01 зависит также и от точности измерительного прибора датчика линейных перемещений. Так, использованный в экспериментах прибор с индуктивными преобразователями модели 275 позволяет измерять линейные размеры с точностью до 3 %, что составляет, например, при диапазоне измерения 25 мкм – 0,75 мкм.

С нашей точки зрения, эффективность разработанной конструкции трибодилатометра во многом обуславливается теми принципами, которые были использованы в процессе выполнения комплекса научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Отметим некоторые из них. Принцип методического единства предполагает, что создаваемые приборы должны использоваться в соответствии с разработанными методиками измерений. В данном случае – с методиками измерений износа, дилатации и деформации трибосистем. Принципы совместимости и универсальности связаны с воз-

можностями более широкого использования разработанных трибодилатометров. Они должны иметь возможность достаточно несложной адаптации к машинам трения различных типов и связанных с этим условий испытаний, конструкций испытываемых узлов трения, типов исследуемых материалов, параметров окружающей среды и др.

Достигаемая трибодилатометром точность измерений (до долей микрометра) позволяет эффективно использовать его при выполнении научных исследований. При относительно несложной модернизации его можно применять для контроля износа деталей и узлов самых разнообразных машин и механизмов в эксплуатационных условиях.

ГЛАВА 4. ИЗНАШИВАНИЕ И ДИЛАТАЦИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРИБОСИСТЕМ

Постоянно повышающиеся требования к трибологической надежности узлов трения приводят к частичной или полной замене металлов другими более качественными материалами. Но и в настоящее время металлы продолжают оставаться одними из самых широко используемых материалов триботехнического назначения. При изготовлении подшипниковых пар используют различные сочетания металлических материалов. Наиболее часто трущиеся сопряжения изготавливают из двух относительно твердых, например, специальных сталей (покрытий) или одного твердого (сталь, чугун) и одного более мягкого (латунь, бронза и др.) материалов.

4.1. Узлы трения скольжения сталь–сталь

С целью оценки возможностей использования разработанных методик измерений для изучения изнашивания трибосистем, изготовленных из сталей, были проведены следующие эксперименты. Пара трения скольжения (классификационный символ по SBT-1.2.2/5 – линейный контакт, образованный валом и плоским вкладышем), изготовленная из стали NC6 (PN-77/H-85023), исследовалась на изнашивание в условиях колебательного (возвратно-поступательного) движения. Испытания проводились на триботестере Т-05 при нагрузке 600 Н и одноразовой смазке испытываемого сопряжения пластичным смазочным материалом LT 4S2 (BN-73/0536-15). Шероховатости вала и вкладыша находились в пределах от 0,30 до 0,35 и от 0,1 до 0,15 мкм, соответственно. Путем настройки триботестера были установлены: угол осцилляции – 90° и частота колебаний – 52 цикла в минуту.

Результаты исследований стальных пар трения на изнашивание представлены в таблице 4.1.

Проведенные эксперименты подтвердили принципиальную возможность использования разработанных методик для исследования изнашивания материалов в условиях возвратно-поступательного движения.

Следует отметить, что испытания трибосопряжений в условиях колебательного движения имеют свою специфику. Это, в первую

очередь, касается несколько более повышенных, чем обычно, требований к микрогеометрии используемых образцов. Специфический характер и параметры движения могут изменять как тепловой режим работы испытываемых узлов, так и условия функционирования фрикционных устройств самого трибоанализатора. Это, в свою очередь, требует некоторой доводки, а в ряде случаев и модернизации методик измерений износа и дилатации узлов трения.

Табл. 4.1. Изнашивание стальных узлов трения скольжения в условиях возвратно-поступательного движения

Параметр	Количество циклов испытаний					
	1500	2500	6000	9500	12500	20000
Линейный износ, мкм	15,2	25,4	38,1	41,4	38,1	49,2

Довольно часто триботехнические испытания проводятся с целью сравнительной оценки свойств существующих или разработки новых смазочных материалов. Проведенные исследования показали (рис. 4.1), что предложенные методики измерений позволяют эффективно решать и такого рода задачи.

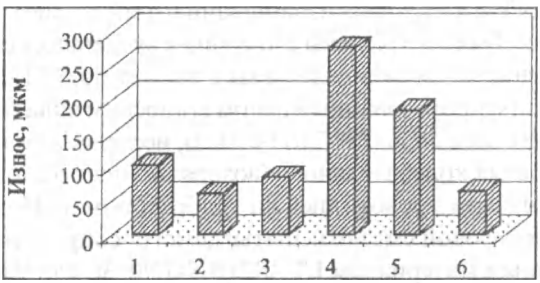


Рис. 4.1. Влияние типа смазочного материала (1 – ЖРО, 2 – ЖРО + 1,0 об. % МКФ – 18У, 3 – ЖРО + 5,0 мас. % меди, 4 – СТПЗ, 5 – ВНИИ НП – 232, 6 – Циатим – 201) на износ пар трения скольжения вал (сталь 40Х) – вкладыш (сталь 33 ХГС с хромовым покрытием); условия испытаний: нагрузка – 2,5 МПа, скорость – 0,628 м/с, продолжительность – 1,8 кс.

Как видно из представленных данных, наименьшие значения износа получены при испытании сопряжений, смазываемых пластичными смазочными материалами ЖРО (с добавкой 1,0 об. % металлоплакирующей присадки МКФ-18У) и Циатим-201.

Следует отметить, что разработанный трибоанализатор модели PCLW-01 отличается высокой степенью адаптации к конструкциям испытательных машин и исследуемых узлов трения. Для примера,

на рис. 4.2. представлены результаты исследований изнашивания узлов трения качения.



Рис. 4.2. Влияние продолжительности испытаний на износ пар трения качения (сталь 40Х); условия испытаний: нагрузка – 3250 Н, скорость – 1 м/с, проскальзывание – 10 %, смазка – погружение в ванну с СТПЗ

Полученная зависимость износа сопряжений от продолжительности испытаний имеет вид, характерный для стадии приработки пар трения. Некоторая стабилизация значений износа наступает практически только после четырехчасового периода испытаний узлов.

Одним из главных принципов, положенных в разработку методик трибодилатометрических измерений, являлся принцип универсальности. Одним из аспектов универсальности является отсутствие каких-либо ограничений, накладываемых как на методическое обеспечение, так и на сам измерительный процесс. Приведенные выше данные позволяют утверждать, что разработанные методики являются в достаточной степени универсальными и могут использоваться для контроля величины износа сопряжений в условиях возвратно-поступательного движения, оценки сравнительной эффективности различных смазочных материалов, а также износа узлов трения качения.

4.2. Узлы трения скольжения сталь–бронза

[930, 936, 946, 947, 959]

Можно с большой уверенностью утверждать, что сопряжения, выполненные из стального вала и бронзового вкладыша, являются одними из наиболее широко распространенных в сельскохозяйственном машиностроении, железнодорожном транспорте, ряде других отраслей народного хозяйства. Изнашивание таких сопряжений изучено достаточно хорошо. Однако совместные исследования износа и дилатации такого рода узлов трения, несмотря на совершенно оче-

видную их актуальность, до настоящего времени не проводились.

Проведенные нами эксперименты (рис. 4.3) показали, что повышение скорости скольжения приводит не только к увеличению износа узлов трения, но и росту значений их теплового расширения (дилатации).

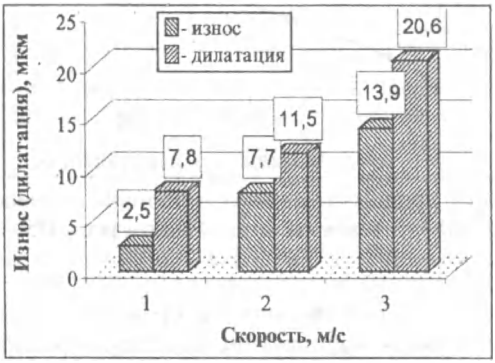


Рис. 4.3. Влияние скорости скольжения на износ и дилатацию сопряжений сталь (NC6) – бронза (B101) при постоянной нагрузке (150Н) и переменной скорости: 0,06 (1); 0,12 (2); 0,18 (3) м/с.

Следует обратить внимание на то, что абсолютные значения дилатации превосходят величины износа сопряжений сталь–бронза. Причем, разница между ними сохраняется и при ужесточении теплового режима работы (повышения скорости скольжения) подшипниковых узлов. В этой связи следует еще раз (впервые это было сделано во второй главе настоящей книги) подчеркнуть важность учета дилатации при измерениях линейного износа узлов трения. Пренебрежение этим обстоятельством, например, при измерении линейного износа сопряжений с использованием индикаторов часового типа, может обусловить возникновение погрешностей измерений, оцениваемых величинами в несколько десятков или даже сотен процентов. Говорить об объективном характере и научной стороне такого рода исследований просто не представляется возможным.

Фрикционная и термоизносная характеристики сопряжений сталь – бронза, полученные при ступенчатом изменении скорости скольжения в процессе испытаний узлов, представлены на рис. 4.4.

Коэффициент (сила) трения сопряжений имела минимальные значения при более высоких скоростях скольжения (рис. 4.4 б). При этих же скоростях наблюдалась наибольшая дилатация узлов трения (рис. 4.4 а), имевшая значения (в данных условиях испытаний) порядка 20

мкм, что примерно в два раза превышало величины линейного износа испытанных трибосистем. Форма термоизносной характеристики свидетельствует, что линейный размер сопряжений заметно изменяется при варьировании (увеличении или уменьшении) скорости в процессе испытаний узлов трения.

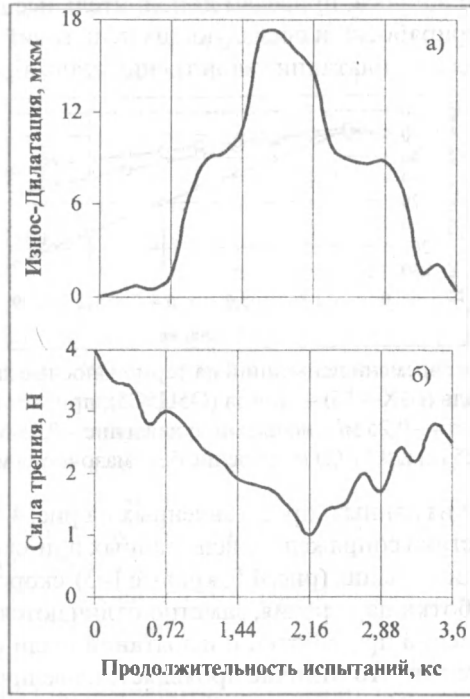


Рис. 4.4. Термоизносная (а) и фрикционная (б) характеристики сопряжений сталь (NC6) – бронза (B101); условия испытаний: время (на одном скоростном режиме) – 0,72 кс; нагрузка – 150 Н; скорость – 0,06, 0,12, 0,18, 0,12, 0,06 м/с; трение без смазочного материала.

Вышеизложенные результаты экспериментов позволяют критически оценить современный уровень некоторых стандартизированных и широко используемых в трибологической практике методов испытаний материалов на изнашивание. Практически все методы, предусматривающие проведение испытаний при режимах, изменяющих тепловое состояние трибосистемы, при оценке линейного износа будут иметь весьма значительные погрешности измерений.

Например, особенно актуальным будет учет дилатации при проведении ускоренных ресурсных испытаний узлов трения с периоди-

ческим форсированием режима (ГОСТ 23.205-79).

При разработке методологических основ трибодилатометрии (глава 2) уже указывалось на необходимость учета технологической и эксплуатационной наследственности при разработке методик трибодилатометрических испытаний сопряжений. Учитывая особую важность этого вопроса, приведем дополнительные данные о влиянии режимов приработки и последующих испытаний на результаты измерений износа и дилатации узлов трения сталь–бронза (рис. 4.5).

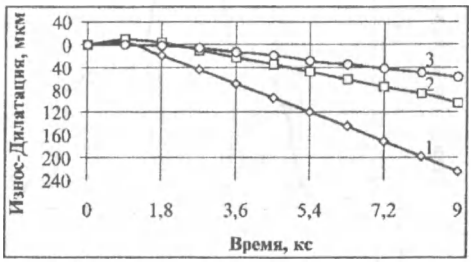


Рис. 4.5. Влияние времени испытаний на термоизносные характеристики сопряжений сталь (ШХ – 15) – бронза (О5Ц5С5); приработка: давление – 0,15 МПа, скорость – 0,25 м/с; испытания: давление – 0,15 МПа, скорость – 0,34 (1), 0,25 (2) и 0,17 (3) м/с; трение без смазочного материала.

Как следует из данных, представленных на рис. 4.5, термоизносные характеристики сопряжений, испытанных при скоростях, больших, равных или меньших (рис. 4.5, кривые 1–3) скорости предварительной приработки пар трения, заметно отличаются друг от друга (величины давлений приработки и испытаний были одинаковы). В наибольшей степени это отличие проявляется в величине износа узлов трения.

Как уже было показано ранее в главе 2, влияние предыстории (эксплуатационной наследственности) на износ и дилатацию трибосопряжений целесообразнее всего оценивать при значении коэффициента трансформации $K_{PV} = 1$. Эксперименты на парах трения скольжения сталь–бронза также подтверждают это. Исследования позволили установить, что при $K_{PV} = 1$ влияние скорости на изменение износа и дилатации трибосистем примерно в 2,5 раза больше, чем влияние нагрузки. Испытания при $K_{PV}=1$ приводят к заметному изменению (увеличению или уменьшению) износа и дилатации трибосистем. Характерно, что испытания при $K_{PV} < 1$ приводят к более резкому изменению значений износа и дилатации по сравнению с испытаниями сопряжений при $K_{PV} > 1$. Так, эксперименты показа-

ли, что после завершения испытаний при $K_{PV} = 0{,}73$ отклонение линейного размера трибосистемы от исходного составило 224 мкм, а при $K_{PV} = 1{,}47$ – только 57,2 мкм. Для сравнения, при $K_{PV} = 1$ это отклонение составило 103,5 мкм. Полученные результаты экспериментов позволяют считать, что для повышения достоверности и снижения погрешности измерений износа и дилатации трибосистем необходимо проводить испытания при $K_{PV} = 1$. Если в силу каких–либо причин (целей исследования, ограниченных возможностей экспериментального оборудования и др.) это не может быть осуществлено, целесообразно повысить качество получаемой информации об износе и дилатации узлов трения путем разработки специальных исследовательских приемов и методик.

Несколько меньшее влияние на износ оказывает варьирование давления (при постоянном значении скорости скольжения в ходе приработки и испытаний) в процессе исследований изнашивания сопряжений. Испытания при давлениях больших, равных или меньших величины давления приработки, привели, соответственно, к следующим значениям износа: 59,1, 42,29 и 19,71 мкм.

Проведение испытаний узлов трения при фиксированных нагрузочно-скоростных режимах (давление – 0,15 МПа, скорость – 0,25 м/с) и переменных (по скорости и давлению) режимах приработки подтвердило влияние эксплуатационной наследственности (предыстории) на величину износа сопряжений. При этом более жесткие режимы приработки (давление 0,20 МПа) обеспечивали минимальную величину износа сопряжений.

Исследования показали также, что абсолютные значения скоростей скольжения при приработке оказывают заметно большее влияние на износ пар трения сталь – бронза, чем величины удельных нагрузок. В первом случае (скорость) значения износа сопряжений находились в пределах от 103,5 до 127,76 мкм, во втором (давление) – от 27,85 до 42,29 мкм.

Обобщая представленные выше данные, можно констатировать, что удельная нагрузка и особенно скорость скольжения в ходе приработки и последующих испытаний оказывают большое влияние на характер изменения термоизносных характеристик и величину износа сопряжений сталь–бронза.

4.3. Особенности изнашивания и дилатации металлических трибосистем

Проведенные исследования позволили установить ряд интересных закономерностей изменения термоизносных характеристик сопряжений сталь–бронза в зависимости от состояния зоны фрикционного контакта и режимов испытаний.

Исследования пар трения сталь (NC6)–бронза (B101) проводились на триботестере Т-05, оснащенном трибоанализатором PCLW-01. (Состав мас. % стали NC6: C 1,3–1,45, Mn 0,5–0,7, Si 0,15–0,35, Cr 1,3–1,6, V 0,1–0,25; бронзы B101 – аналог Бр ОФ 10-1: Sn 9–11, P 0,8–1,2).

Испытания при трении без смазочного материала показали, что для данной трибосистемы и режимов ее испытаний характерным является состояние, описываемое термоизносной характеристикой, имеющей классическую форму (рис. 4.6, кривая 1). Образцы такого вида термоизносных характеристик были представлены ранее на рис. 2.1, 2.11, 2.12 и др. После остановки узла (без разборки), введения в зону трения небольшого количества (0,00012 г.) моторного масла HIPOL-15 и последующего испытания была зафиксирована термоизносная характеристика (рис. 4.6, кривая 2), принципиально отличающаяся от полученной ранее. Введение смазочного материала практически полностью устранило стадию перехода материала в квазистационарное тепловое состояние.

Последующие значительные изменения термоизносной характеристики произошли после третьего испытания (рис. 4.6, кривая 3). От второго оно отличалось тем, что после остановки испытываемого узла производилась его тщательная очистка органическими растворителями (ацетон, четыреххлористый углерод) и сушка, а уже потом осуществлялось смазывание и испытание. Термоизносная характеристика свидетельствует, что в начальный период испытания (примерно в течение 0,2 кс) происходит небольшое изменение линейного размера испытываемой трибосистемы. Впоследствии термоизносная характеристика принимает вид растянутой вдоль оси времени синусоиды с довольно точным периодическим чередованием ее выступов и впадин. Исследования позволили определить, что величина периода колебаний линейного размера узла трения зависит от скоростного режима испытаний — период уменьшается при увеличении скорости.

Анализ термоизносных характеристик, представленных на рис.

4.6, позволяет сделать следующие предположения о характере процессов, приводящих к возникновению периодических колебаний линейных размеров узлов трения скольжения сталь–бронза.

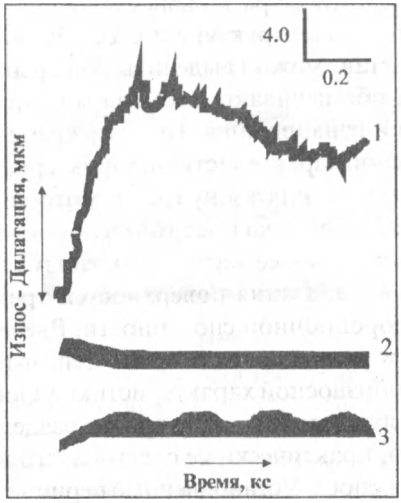


Рис. 4.6. Термоизносные характеристики сопряжения сталь (NC6) – бронза (B101): 1 – трение без смазочного материала, 2 – введение в зону трения 0,00012 г масла HIPOL – 15, 3 – очистка поверхностей трущихся элементов и введение в зону трения 0,00012 г масла HIPOL –15.

Трение стали по бронзе без смазочного материала сопровождается упругопластическим взаимодействием поверхностей контактирующих материалов. На каждой из контактных поверхностей образуются переходные слои, отделяющие объемы материалов от влияния собственно процессов трения и изнашивания. Эти слои, включающие в себя пленки переноса, отличаются динамической устойчивостью и способностью восстанавливать свои параметры (состав, толщину и др.) в процессе фрикционного взаимодействия тел. В общем случае, основываясь на форме термоизносной характеристики, следует различать два типа переходных слоев. Первый из них, образующийся на стадии выхода узла трения в режим квазистационарного теплового состояния, отличается неустойчивостью и постоянным изменением своих параметров. Второй — характеризуется параметрами, близкими к постоянным, и свойственен трибосопряжениям в период их изнашивания в квазистационарном тепловом состоянии. Введение в зону трения смазочного материала приводит к заполнению им части поверхности между пленками переноса и объема пере-

ходных слоев поверхностей трения. В этом случае третье тело трибосистемы создается из частиц переноса и смазочного материала, которые, перемешиваясь, создают достаточно устойчивую термодинамическую систему. Структура и свойства такой системы в первом приближении похожи на структуру и свойства пластичных смазок (например, в их составе можно выделить дисперсную фазу и дисперсионную среду) и обеспечивают стабильный характер протекания процессов трения и изнашивания. Подтверждением этого является форма термоизносной характеристики, характерная для сопряжений сталь–бронза после введения в зону трения моторного масла HIPOL-15 (рис. 4.6, кривая 2). Очистка поверхностей приводит к удалению с них пленок переноса, а также части переходных слоев. Результатом очистки является активизация поверхностей трения, в частности, повышение их адсорбционной способности. Введение в зону фрикционного контакта очищенных поверхностей моторного масла изменяет форму термоизносной характеристики узлов трения (рис. 4.6, кривая 3). В этом случае поверхности трения разделяются слоем смазочного материала, практически не содержащего включений в виде твердых пленок переноса. Установленные периодические колебания толщины смазочного слоя, как это следует из термоизносных характеристик, имеют величину порядка 1,5–2,0 мкм и могут быть связаны с усталостным разрушением поверхностей трения находящихся под смазочным слоем. Периодический характер усталостных разрушений поверхностей трения в настоящее время является неоспоримым фактом. Требует своей проверки гипотеза о влиянии поверхностной энергии изнашиваемых поверхностей, связанной с их адсорбционной способностью, на толщину смазочного слоя в трибосопряжении. Вполне возможно, что периодический процесс разрушения в значительной степени обусловливается квазикристаллическим состоянием, приобретаемым смазочным слоем под действием больших нагрузок.

Исследования позволили установить, что термоизносная характеристика сопряжений сталь–бронза, полученная при очистке и последующем смазывании поверхностей трения, отличается памятью фазы колебаний (рис. 4.7). На практике это свойство проявляется в том, что характеристика фактически не изменяет свою форму при непродолжительных остановках испытываемых узлов трения. Каждое последующее испытание (рис. 4.7, кривые 1–3) начинается практически с того же самого места на диаграмме (фазы), на котором завершилось предыдущее. Полученные результаты могут объясняться

на основе уже изложенных выше (при обсуждении данных, представленных на рис. 4.6) соображений.

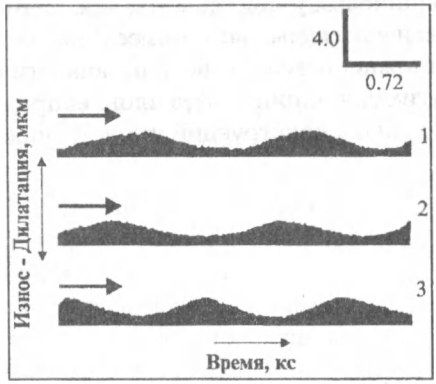


Рис. 4.7. Термоизносные характеристики трибосопряжений сталь (NC6) – бронза (B101); условия испытаний: нагрузка – 150 Н, скорость – 0,06 м/с, продолжительность – 3 последовательных цикла (1 – 3) в режиме «работа – остановка» по 4,0 кс каждый; очистка поверхностей и последующее смазывание маслом HIPOL – 15.

Как с теоретической, так и с практической точек зрения весьма значительными следует признать результаты исследований (рис. 4.8), позволившие установить связь между износом, с одной стороны, максимальной дилатацией и соответствующим ему временем испытаний узлов трения сталь – бронза, с другой стороны. Получение такого рода результатов стало возможным лишь при использовании разработанных автором методик измерений, предусматривающих использование нового типа прибора — трибодилатометра.

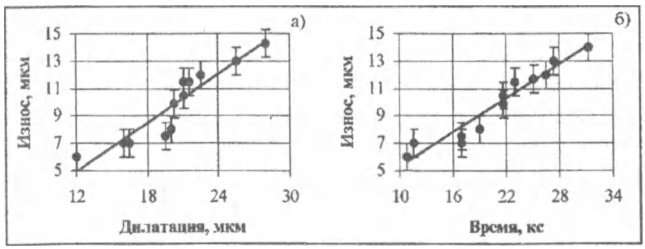


Рис. 4.8. Влияние максимальной дилатации (а) и соответствующего ей времени испытаний (б) на износ трибосопряжений сталь (NC6) – бронза (B101); условия испытаний: нагрузка – 150 Н, скорость – 0,06, 0,12 и 0,18 м/с, продолжительность – 4,0 кс, трение без смазочного материала.

Представленные на рис. 4.8 данные экспериментов позволяют использовать их для разработки методов диагностики высоконагруженных подшипниковых узлов машин и механизмов.

Представляют значительный интерес исследования, посвященные установлению возможностей существования аналогичных зависимостей для ряда других сочетаний материалов, например, металл–керамика, металл–резина, и конструкций узлов трения.

ГЛАВА 5. ИЗНАШИВАНИЕ И ДИЛАТАЦИЯ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ТРИБОСИСТЕМ

Металлополимерные узлы трения стали объектом пристального внимания ученых трибологов и специалистов-практиков из различных отраслей народного хозяйства страны только во второй половине двадцатого века. Практически сразу были определены одни из наиболее оптимальных форм использования уникальных свойств полимерных композиций: в виде монолитных полимерных деталей и в форме тонкослойных полимерных покрытий на металлах, резинах и некоторых других материалах. Прошедшие годы только подтвердили перспективность трущихся сопряжений такого типа.

5.1. Монолитные полимерные детали

[925, 927, 928, 930, 940, 941]

Полимерные детали трения в виде толстостенных втулок, вкладышей и пластин преимущественно применяются в сопряжениях с достаточно большой (иногда достигающей нескольких миллиметров) величиной износа. В настоящее время одними из наиболее распространенных и широко используемых в различных отраслях промышленности полимерных материалов являются полиамиды.

Разработанный метод трибодилатометрической диагностики использован для оценки износа исходных и модифицированных деталей (вкладышей), изготовленных из поликапроамида (ПКА) марки Б. Для модифицирования полимера использовали иодинол, являющийся продуктом присоединения молекулярного (кристаллического) йода к поливиниловому спирту (А. с. 939464). Предварительные исследования показали, что модифицирование йодинолом позволяет улучшить ряд свойств ПКА. Например, в результате модифицирующей обработки снизилось водопоглощение (с 9,7 до 8,9 %), увеличилась микротвердость (с 162 до 173 МПа) и теплостойкость по Вика (с 476 до 483 К) полимерного материала. Модифицирование йодинолом улучшило триботехнические свойства ПКА (рис. 5.1). Рентгенографические исследования показали, что образцы исходного ПКА имели кристаллическую структуру, состоящую из γ-формы. Увеличение аморфного гало у образцов, обработанных йодинолом, свидетельствует о частичной аморфизации поверхностных слоев при

одновременном увеличении количества кристаллических областей полимера, находящихся в γ-форме. Наблюдаемое уменьшение степени упорядочения структуры объясняется диффузией иода как в аморфные, так и в кристаллические области полимерных образцов с образованием небольшого количества крупных комплексов ПКА–йод и разрушением водородных связей. Необходимо отметить, что образующаяся при этом структура полимера отличается повышенной устойчивостью к тепловому воздействию и существенно не изменяется даже при жестких (433 К и 18 кс) условиях термообработки образцов, что, возможно, связано со структурирующим действием одного из компонентов иодинола – поливинилового спирта. Однако после фрикционных испытаний структура в поверхностном слое полимера состоит преимущественно из α-модификации.

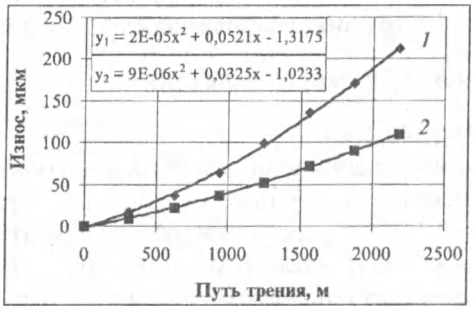


Рис. 5.1. Влияние пути трения на износ исходных (1) и модифицированных иодинолом (2) образцов поликапроамида; условия испытаний: давление – 0,7 МПа, скорость – 0,52 м/с; трение без смазочного материала.

Это свидетельствует о том, что кристаллическое состояние ПКА, характеризуемое γ-формой, является мезоморфным, имеющим тенденцию в результате фрикционного воздействия к переходу к состоянию с более стабильной упаковкой макромолекул (α-форма).

Исследования позволили установить, что в начальный период работы модифицированный полимер изнашивает контртело несколько больше, чем исходный полимер, и меньше, чем подшипник, изготовленный из бронзы. Однако в процессе последующей работы изнашивание стального вала модифицированным полимером снижается и становится меньше, чем у исходного ПКА и бронзы. Имеются основания предположить, что в начальный период трения обработанного иодинолом ПКА по стали происходит интенсивное химическое взаимодействие композиционного материала и металла (износ контртела), которому в большой степени способствуют высокие

локальные температуры и наличие в зоне фрикционного контакта химически активных веществ, например, йода. Известно, что ряд солей иода, обладающих слоистой структурой, с успехом используются в триботехнике в качестве твердых смазок для узлов трения. При создании определенных условий в трущемся сопряжении модифицированный ПКА–сталь возможно улучшение антифрикционных свойств системы за счет образования соединений типа иодистого железа $FeI_2 \cdot 4H_2O$. Такие соединения, обладающие низкой температурой плавления (от 363 до 371 К), способствуют локализации процесса трения и изнашивания в тонких граничных слоях материалов и обеспечивают надежную работу металлополимерных узлов трения.

Ранее (глава 2), при изложении методологических основ трибодилатометрии, были представлены некоторые результаты испытаний узлов трения скольжения, в которых вкладыш был изготовлен из полиамидов или композиционных материалов на их основе, а вал – из стали. Представленные данные свидетельствуют, что изнашивание и дилатация в первом приближении являются величинами одного порядка, достигающими в процессе испытаний металлополимерных трибосопряжений значений в несколько десятков микрометров. Было отмечено, что при непрерывной оценке линейного износа подшипниковых узлов, особенно при переменных нагрузочно-скоростных режимах испытаний, пренебрежение значениями теплового расширения (дилатации) может привести к весьма значительным погрешностям измерений. Также указывалось на необходимость учета влияния технологической и эксплуатационной наследственности на трибологические характеристики сопряжений. Отличающиеся режимы приработки и последующих испытаний трибосистем обуславливают получение различных по своей форме термоизносных характеристик.

Проведенные исследования позволили получить дополнительные данные, подтверждающие взаимную связь износа трибосистем, формы термоизносных характеристик и нагрузочно-скоростных режимов их приработки / испытаний (рис. 5.2).

Анализ данных, представленных на рис. 5.2, позволяет сделать следующие выводы. Испытания при давлении, отличающемся от того, при котором осуществлялась приработка трибосопряжений, не обеспечивают получение во время первых из серии нескольких последовательных тестов одной и той же пары трения стабильных термоизносных характеристик. Под стабильной (или классической, см. рис. 2.1, 2.10–2.12 и др.) термоизносной характеристикой мы будем пони-

мать такую, которая имеет четко обозначенный во времени период, свидетельствующий о стабилизации теплового состояния (линейного размера) трибосистемы. За ним следует период квазистационарного изнашивания при установившемся тепловом состоянии узла трения. Как видно из представленных на рис. 5.2 данных, стабильная термоизносная характеристика была получена во время четвертого испытания. Параметры этой характеристики (величина максимальной дилатации, время выхода в режим квазистационарного теплового состояния, величина износа за цикл испытаний) были практически идентичными во время четвертого, пятого и последующих тестов.

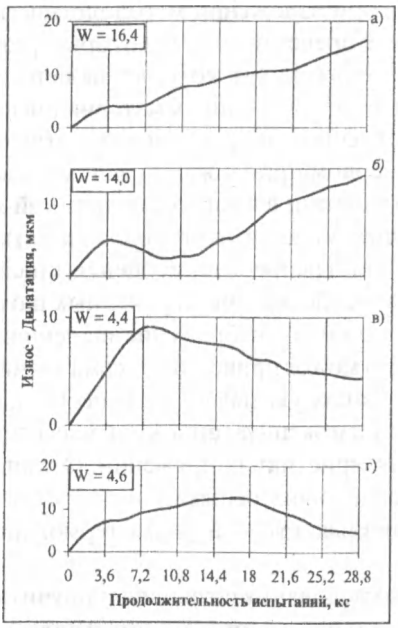


Рис. 5.2. Влияние времени испытаний на характер изменения термоизносных характеристик и износ сопряжений сталь – композиционный полиамид: а-г – последовательные испытания узла трения; режимы приработки: 0,5 МПа и 0,21 м/с; испытаний: 0,25 МПа и 0,21 м/с; $R_{а\ ст.вала}$=0,37 мкм.

Стабилизация формы термоизносной характеристики, по нашему мнению, должна рассматриваться как свидетельство стабильного состояния свойств тонких поверхностных слоев материалов, участвующих в трении. Подтверждением этому являются значения из-

носа сопряжений, полученные после завершения каждого последовательного испытания узлов.

Вместе с тем, результаты экспериментов (рис. 5.2) позволяют оценить толщину поверхностного слоя полимерного подшипника скольжения, хранящего предысторию (эксплуатационную наследственность) приработочного режима. Простое суммирование величин износов последовательных испытаний, термоизносные характеристики которых приведены на рис. 5.2, показывает, что оно имеет величину от 35 до 40 мкм. Представляется, что методическое развитие этих экспериментальных исследований может привести к созданию ряда оригинальных методик анализа тонких поверхностных слоев трибоматериалов.

С определенной долей уверенности можно констатировать, что в последнее время наблюдается тенденция некоторого снижения практического использования монолитных полимерных подшипников. Весьма вероятной причиной этого, кроме высокой стоимости материалов, использованных для изготовления деталей, является высокие тепловая нагруженность и, соответственно, износ и дилатация таких узлов трения.

5.2. Полимерные покрытия на металлах

[918, 940]

Полимерные покрытия на металлах позволяют, по сравнению с монолитными деталями, добиться улучшения некоторых служебных характеристик и условий работы металлополимерных трибосопряжений. В узлах трения с полимерным покрытием существенно улучшается отвод тепла из зоны фрикционного контакта. Как правило, это приводит к снижению потерь на трение, износа и дилатации подшипниковых узлов. В ряде случаев полимерные покрытия являются единственным способом обеспечения требуемого уровня трибологической надежности сопряжений. Наиболее часто в качестве основы полимерных покрытий используют термопластичные полимеры: полиамиды, пентапласт, полиолефины, фторопласты и др.

Для более широкой проверки возможностей разработанных экспериментальных методик были проведены испытания полиэтиленовых и пентапластовых покрытий в зависимости от температуры их формирования (рис. 5.3) и содержания наполнителей (рис. 5.4).

Результаты экспериментов, приведенные на рис. 5.3 и 5.4, показывают, что технологические режимы формирования покрытий (технологическая наследственность) и содержание наполнителей (окси-

дов металлов) оказывают большое влияние на износные характеристики сопряжений термопластичный полимер–металл.



Рис. 5.3. Влияние пути трения на износ полиэтиленовых покрытий, сформированных при 443 (1), 473 (2) и 553 К (3); условия испытаний: давление – 1,5 МПа, скорость – 0,3 м/с, трение без смазочного материала.



Рис. 5.4. Влияние содержания оксидов меди (1) и кадмия (2) на интенсивность линейного изнашивания пентапластовых покрытий; условия испытания: давление – 0,75 МПа, скорость – 0,26 м/с; трение без смазочного материала.

В зависимости от технологических режимов формирования (например, охлаждения расплава полимера) детали с покрытиями из полиамидов могут быть получены в трех структурных состояниях: аморфном (δ-форма), мезоморфном (γ-форма) и кристаллическом (α-форма). В результате эксплуатации подшипниковых узлов в среде, характеризующейся повышенными значениями температур, а также в результате воздействия тепла трения, структурное состояние материалов может изменяться. Весьма вероятно, что это может привести и к изменению целого комплекса физико-механических, теплофизических, структурных, триботехнических и некоторых других свойств материалов узла трения.

Модельные металлополимерные соединения получали плавлением порошка поликапроамида (ПКА) между алюминиевой фольгой.

Фольга предварительно очищалась от загрязнений и закреплялась на поверхности алюминиевой пластины (40 х 75 х 5 мм). Толщина адгезионного шва составляла от 0,3 до 0,5 мм. После расплавления полимера образцы охлаждали по двум режимам – на воздухе при температуре от 290 до 295 К (медленное охлаждение) и в воде при температуре от 285 до 290 К (быстрое охлаждение). После охлаждения склейки освобождали от алюминиевых пластин и отжигали в термошкафу при температурах от 435 до 440 К в течение от 0,9 до 10,8 кс.

Для медленно охлажденного ПКА адгезия и микротвердость не изменяются в процессе отжига. На рентгенограммах (рис. 5.5) медленно охлажденного ПКА наблюдаются два пика при углах $2\theta = 20{,}5$ и 24,0°, характерных для кристаллической структуры полимера (α-форма). В процессе отжига таких образцов кристаллическая структура не претерпевает существенных изменений. Наблюдается некоторое перераспределение площадей α-пиков. Можно предположить, что в результате отжига несколько изменяется размер кристаллических блоков ПКА. Для рентгенограмм быстро охлажденного ПКА характерно наличие одного пологого пика с максимумом при углах 2θ от 20 до 22 градусов. Пик при угле $2\theta = 21°$ характерен для аморфной структуры (δ-форма), а пик при угле 21,5° – для мезоморфной (γ-формы) структуры полимерного материала. Мезоморфный пик отчетливо проявляется на ранних стадиях отжига быстро охлажденного полимера. При увеличении длительности отжига площадь мезоморфного пика увеличивается и появляются кристаллические пики при углах $2\theta = 20{,}5$ и 24 градуса.

Адгезия быстро охлажденного ПКА значительно выше, чем медленно охлажденного. Так как микротвердость быстро охлажденного ПКА относительно высокая (составляет около 50 % от микротвердости медленно охлажденного полимера), можно предположить (с учетом формы рентгенограмм), что его структурное состояние является не чисто аморфным, а аморфно-мезоморфным, т. е. смесью δ и γ-форм. В процессе отжига происходит увеличение доли γ-формы и появление кристаллической α-формы. При этом адгезия к алюминию ПКА уменьшается, а микротвердость увеличивается. Следует отметить, у быстро охлажденных, а затем отожженных при значениях температур от 435 до 440 К образцов, предельные значения адгезии несколько выше, а микротвердость ниже, чем у медленно охлажденных образцов.

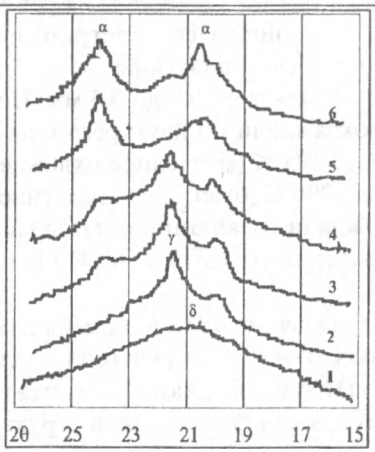


Рис. 5.5. Рентгенограммы быстро (1 – 4) и медленно (5, 6) охлажденного из расплава поликапроамида: 1, 5 – неотожженные образцы; 2, 3, 4, 6 – отожженные в течение 0,9; 3,6; 10,8; 3,6 кс.

Следовательно, кристаллизация отрицательно влияет на адгезию ПКА к металлу, определяемую методом отслаивания. Уменьшение адгезии, по нашему мнению, может быть обусловлено тремя причинами: образованием на границе адгезионного контакта слабых слоев вследствие рафинирования полимера при кристаллизации, увеличением внутренних напряжений вследствие кристаллизационной усадки полимера, а также уменьшением деформируемого объема в зоне разрушения адгезионного соединения вследствие увеличения жесткости полимера.

Фрикционные испытания быстро охлажденных и отожженных при различных температурах в течение 3.6 кс поликапроамидных покрытий показали, что кристаллизация приводит к существенному снижению коэффициента трения и повышению износостойкости ПКА (таблица 5.1). Причем, заметное улучшение характеристик происходит при температурах отжига быстро охлажденного ПКА более 350 К, т. е. при температурах, превышающих температуру стеклования полимерного материала.

Табл. 5.1. Антифрикционные свойства поликапроамидных покрытий

Свойства	Температура отжига покрытий, К				
	300	350	400	450	475
Коэффициент трения	0,52	0,51	0,37	0,32	0,33
Интенсивность изнашивания (10^{-7})	5,7	5,6	2,8	2,2	2,25

Таким образом, подтверждая приведенными выше данными вывод о том, что отжиг (термообработка) может использоваться как эффективный метод регулирования (улучшения) свойств ПКА, отметим еще одно важное с нашей точки зрения обстоятельство. Исходная (предэксплуатационная) структура полимеров, по-видимому, должна оказывать заметное влияние на дилатацию металлополимерных трибосопряжений, особенно при температурах, связанных со структурной перестройкой материалов. Для высокомолекулярных веществ такой температурой, например, является температура стеклования материалов. Анализ данных, приведенных в [851], показывает, что переход материала через температуру стеклования сопровождается скачкообразным увеличением его коэффициента теплового расширения. Причем, среднее значение величин коэффициентов теплового расширения, относящихся к температурам до и после температуры стеклования материалов (обработаны данные по приведенным семи наиболее широко используемым полимерам машиностроительного назначения), равняется 2,93. Путем несложных расчетов можно показать, что для ПКА покрытий толщиной 1 мм величина дилатации (в температурном интервале, равном 20 градусам) может составлять до десяти и более микрометров. Весьма вероятными последствиями этого могут быть: изменение фактической площади контакта и деформационных свойств трущихся тел, возникновение локальных областей с отрицательными температурными градиентами (нормально и перпендикулярно поверхности трения), увеличение дилатации и износа поверхностных слоев материалов.

5.3. Полимерные покрытия на резиновых уплотнительных элементах

[938, 944, 957]

Нанесение тонких полимерных покрытий на поверхности резиновых уплотнительных элементов является одним из наиболее эффективных путей улучшения их служебных свойств.

Объектом исследований являлись резинометаллические сопряжения типа вал–вкладыш. Металлические валы изготавливались из стали ШХ-15. Диаметр валов – 40 мм, длина – 12 мм. В экспериментах использовались валы с шероховатостью R_a = 0,093 и 0,432 мкм. Вкладыши изготавливались из бензомаслостойкой резины № 3826 с площадью рабочей поверхности 2 см^2 и шероховатостью R_a = 0,576 мкм. На рабочей поверхности вкладышей было сформировано фто-

ропластовое покрытие толщиной около 0,2 мкм. Нанесение покрытий осуществляли из активной газовой фазы в вакууме. Исследование триботехнических характеристик сопряжений проводили на машине трения СМТ-1, оснащенной трибодилатометром PCLW-01. Смазывание пар трения осуществляли путем погружения нижней части вала в ванну с дизельным топливом Л 62 (ГОСТ 305-82). Предварительные исследования показали, что выдержка резиновых образцов в дизельном топливе при температурах до 320 К в течение 10,8 кс практически не изменяла их массу и линейные размеры.

Экспериментальные исследования позволили, в целом, получить многочисленные убедительные доказательства целесообразности использования полимерных покрытий для снижения потерь на трение и изнашивание резинометаллических сопряжений. Существенное улучшение характеристик отмечено в случае применения полимерных покрытий на основе политетрафторэтилена и полиуретана. Образцы для испытаний при этом изготавливались из резин на основе фторкаучуков, бутадиеннитрильного каучука и силоксанов. Для примера на рис. 5.6 приведены зависимости износа от скорости скольжения для исходных и модифицированных (с полимерным покрытием Ф-4) пар трения. Испытания в этом случае проводились в среде дизельного масла М14.

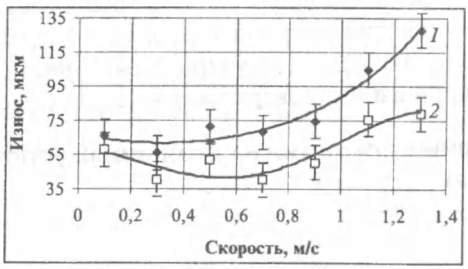


Рис. 5.6. Влияние скорости скольжения на износ исходных (1) и модифицированных (2) резинометаллических сопряжений (резина 3826 – сталь ШХ – 15). Условия испытаний: нагрузка – 30 Н, $R_{а.ст.вкл.}$=0,38 мкм, смазка погружением вала в дизельное масло М 14.

Вместе с тем, исследования как исходных, так и модифицированных фторопластом резинометаллических узлов трения показали, что их термоизносные характеристики имеют четко выраженную периодичность (цикличность). Отметим, что определенная цикличность в изменении термоизносных характеристик была впервые в настоящей работе показана в четвертой главе при представлении результатов

исследований, проведенных на металлических парах трения сталь–бронза.

Для аналитического описания циклически изменяющихся экспериментальных термоизносных и фрикционных характеристик использовали гармонический анализ, т. е. осуществляли представление полученных зависимостей в виде суммы гармоник ряда

$$f(x) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega x + \varphi_n), \qquad (5.1)$$

где A_n – амплитуда; ω – частота; φ_n – фаза n-й гармоники; $n = 1, 2, 3, 4$; $\omega = 1$.

При проведении этой серии экспериментов использовали четыре первые гармоники ряда, а также экспериментальные значения амплитуд и длительности циклов за вторую половину (второй час) испытаний трибосопряжений. Взаимосвязь между экспериментальными и/или расчетными значениями амплитуды и длительности циклов дилатации трибосистем оценивали по величине коэффициента корреляции.

На рис. 5.7 представлены характеристики исследованных резинометаллических сопряжений. В процессе испытаний установлено, что циклический характер изменения присущ не только термоизносной (рис. 5.7 а), но и фрикционной (рис. 5.7 б) характеристике пары трения. Математическая обработка экспериментальных данных показала, что время начала и продолжительность циклов ($t_{ти,ф}$) для обеих характеристик практически синхронизированы. Аналогичным образом соотносятся между собой и значения амплитуд циклов дилатации ($A_{ти}$) и момента (коэффициента) трения ($A_ф$) сопряжений.

Графическим способом на участке термоизносной характеристики, соответствующем установившемуся тепловому состоянию испытываемого узла трения, может быть определена абсолютная величина износа за один цикл W_c. Кроме того, представляется возможным оценить скорость изнашивания как за один, так и за несколько циклов, находящихся на отдельном участке или всей термоизносной характеристике:

$$I_c = \sum_{i=1}^{n} A_{ТИ} \Big/ \sum_{i=1}^{n} t_{ТИ}. \qquad (5.2)$$

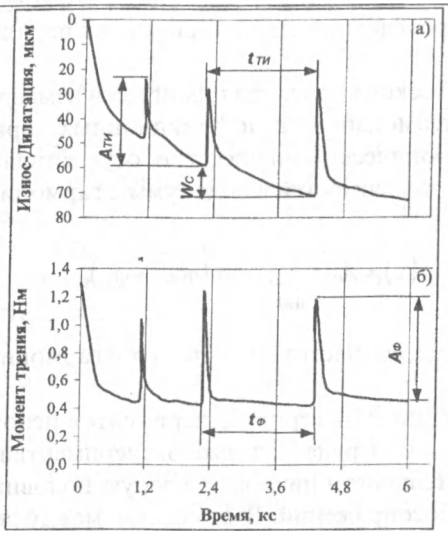


Рис. 5.7. Термоизносная (а) и фрикционная (б) характеристики резинометаллических сопряжений: R_a=0,121 мкм, нагрузка – 50 Н, скорость – 0,4 м/с.

Анализ амплитудных характеристик, представленных на рис. 5.8 и 5.9, свидетельствует, что линейный размер трибосопряжений не является постоянной величиной, а циклически изменяется в процессе всего периода их испытаний. При этом наблюдается чередование циклов дилатации и изнашивания трибосистем. Использование трибодилатометра PCLW-01M позволило с высокой точностью оценить абсолютную величину этих циклов. Так, анализ зависимости $A_{ТИ}(t)$ сопряжения с шероховатостью стального вала R_a = 0,093 мкм (рис. 5.8 а) показывает, что значения амплитуд циклов дилатации и изнашивания находятся в пределах от 3,5 до 13,0 мкм, а для сопряжения с R_a = 0,432 мкм (рис. 5.8 б) – от 5,0 до 53,0 мкм. Средние экспериментальные значения амплитуд циклов для сопряжений с R_a = 0,093 и 0,432 мкм составляют 5,417 и 11,958 мкм, соответственно.

Характеристики, построенные по экспериментально определенным значениям амплитуд циклов дилатации трибосистем (рис. 5.8 а,б, кривые 1), могут быть представлены в виде соответствующих гармонических рядов:

$$A_{ТИ,\,0{,}093}(t) = 5{,}417 + 2{,}429\sin(t + 2{,}792) + 1{,}960\sin(2t + 1{,}6076) + \\ + 1{,}4767\sin(3t - 2{,}856) + 3{,}248\sin(4t - 0{,}013), \qquad (5.3)$$

$$A_{\text{ТИ},\,0,432}(t) = 11{,}958 + 11{,}360\sin(t + 0{,}136) + 5{,}745\sin(2t - 2{,}218) + \\ + 8{,}162\sin(3t + 2{,}582) + 9{,}465\sin(4t + 1{,}229). \qquad (5.4)$$

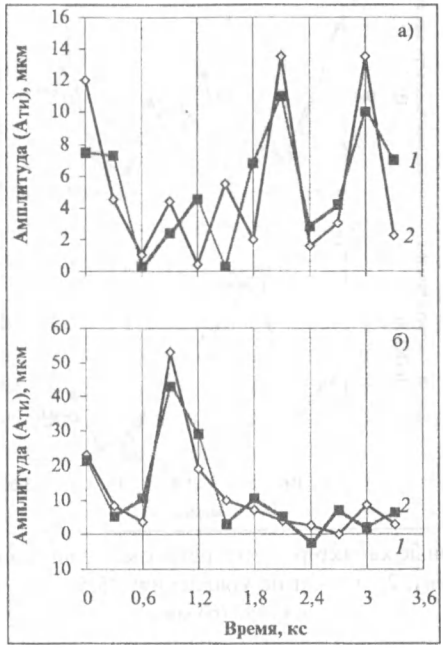


Рис. 5.8. Амплитудные характеристики резинометаллических сопряжений: 1 – эксперимент, 2 – расчет по уравнениям (5.3, 5.4); R_a стального вала 0,093 (а) и 0,432 (б) мкм.

Расчеты показывают, что амплитудные характеристики (рис. 5.8 а, б, кривые 2), построенные с использованием тригонометрических многочленов (5.3, 5.4), достаточно хорошо соответствуют характеристикам (рис. 5.8 а, б, кривые 1), построенным на основе экспериментально определенных значений амплитуд циклов дилатации трибосопряжений. Коэффициенты корреляции равняются 0,697 и 0,902 для сопряжений с шероховатостью стального вала R_a = 0,093 и 0,432 мкм, соответственно.

Исследования позволили установить, что длительность циклов является одним из важнейших параметров, характеризующих трение и изнашивание резинометаллических сопряжений. Временные характеристики, представленные на рис. 5.9 а, б показывают, что, как и в случае амплитудных характеристик, они существенно отли-

чаются для трибосопряжений со стальными валами, имеющими различную шероховатость рабочей поверхности, и могут быть представлены соответствующими гармоническими рядами (5.5, 5.6).

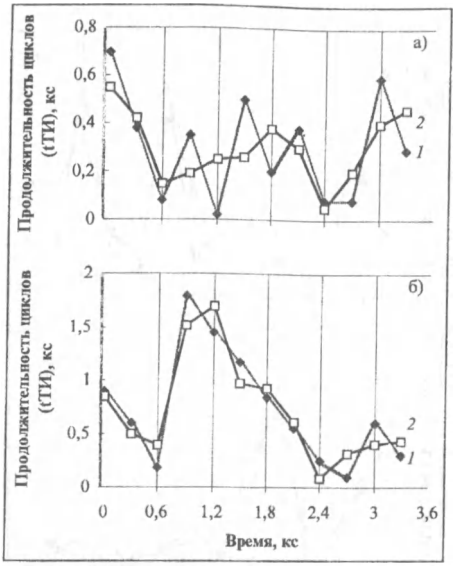


Рис. 5.9. Временны́е характеристики резинометаллических сопряжений: 1 – эксперимент, 2 – расчет по уравнениям (5.5 – 5.6); R_a =0,093 (а) и 0,432 (б) мкм.

Средние экспериментальные значения длительностей циклов резинометаллических сопряжений с шероховатостями стального вала R_a = 0,093 и 0,432 мкм составляют 0,312 и 0,715 кс, соответственно:

$$t_{\text{ТИ, }0,093}(t) = 0,312 + 0,099\sin(t + 1,771) + 0,156\sin(2t + 2,030) + \\ + 0,018\sin(3t - 2,159) + 0,0656\sin(4t + 0,391), \qquad (5.5)$$

$$t_{\text{ТИ, }0,432}(t) = 0,715 + 0,499\sin(t - 0,38) + 0,282\sin(2t - 3,097) + \\ + 0,206\sin(3t + 2,253) + 0,264\sin(4t + 0,739). \qquad (5.6)$$

Степень соответствия характеристик, построенных по экспериментальным (рис. 5.9 а, б, кривые 1) и рассчитанным (рис. 5.9 а, б, кривые 2) по уравнениям (5.5, 5.6) значениям длительностей циклов, оценивается коэффициентами корреляции 0,673 и 0,935, соответственно, для менее и более шероховатых стальных валов.

Исследования позволили установить, что средние значения циклического износа (W_c), т. е. износа за один цикл продолжительностью $t_{ТИ}$, за весь период испытаний трибосопряжений с шероховатостями стального вала 0,093 и 0,432 мкм составляли 2,083 и 8,50 мкм.

Испытания также выявили существование линейной связи между величинами циклического и полного износа трибосистем. Последующее изучение особенностей такой взаимосвязи не на частном, а на общетрибологическом уровне (например, для разных конструкций трибосопряжений, технологических методов обработки поверхностей трения, режимов эксплуатации трибосистем и т. д.) позволит существенно расширить и уточнить наши представления о механизме трения и изнашивания твердых тел.

На рис. 5.10, 5.11 представлены амплитудные и временные фрикционные характеристики пар трения сталь–резина. Как и в описанном выше случае (для термоизносных характеристик), фрикционные характеристики испытанных узлов имеют явно выраженную цикличность. Причем это касается как амплитудных, так и временных фрикционных характеристик резинометаллических сопряжений, между которыми наблюдается достаточно сильная корреляционная связь.

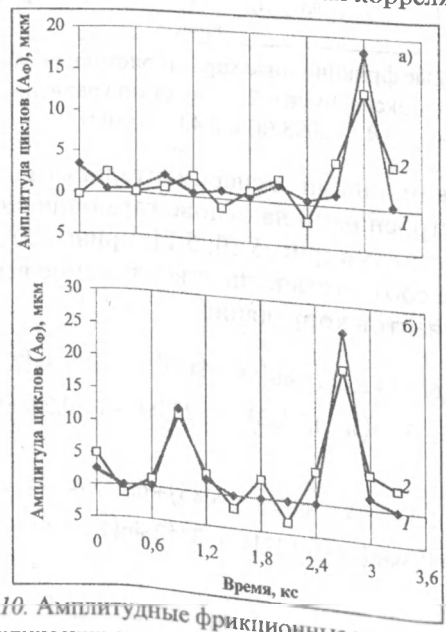


Рис. 5.10. Амплитудные фрикционные характеристики резинометаллических сопряжений: 1 – эксперимент, 2 – расчет по уравнениям (5.7, 5.8); R_a =0,093 (а) и 0,432 (б) мкм.

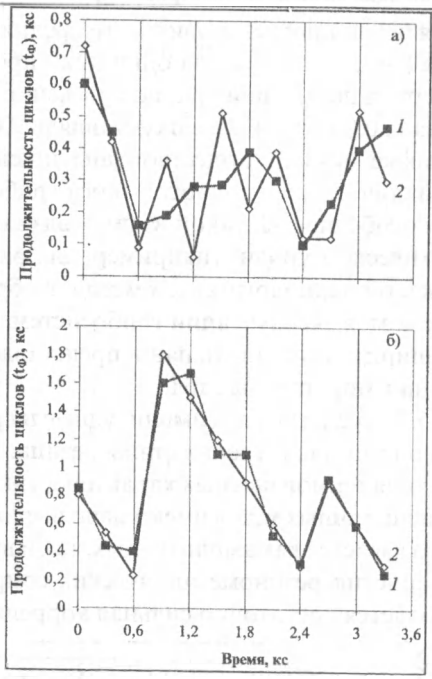


Рис. 5.11. Временные фрикционные характеристики резинометаллических сопряжений: 1 – эксперимент, 2 – расчет по уравнениям (5.9, 5.10); R_a =0,093 (а) и 0,432 (б) мкм.

Между фрикционными экспериментальными (рис. 5.10, 5.11, кривые 1) и построенными на основе гармонических рядов (5.7–5.10) характеристиками (рис. 5.10, 5.11, кривые 2) существует довольно хорошее соответствие, подтверждаемое высокими значениями коэффициентов корреляции:

$$A_{\Phi,\,0,093}(t) = 2{,}6667 + 3{,}0418\sin(t + 2{,}5441) + 2{,}7926\sin(2t - 2{,}6438) + \\ + 2{,}5221\sin(3t - 1{,}7033) + 2{,}8222\sin(4t - 0{,}2385), \qquad (5.7)$$

$$A_{\Phi,\,0,432}(t) = 4{,}0 + 2{,}1973\sin(t + 3{,}0085) + 6{,}1356\sin(2t - 1{,}6296) + \\ + 2{,}2883\sin(3t + 0{,}1831) + 6{,}3852\sin(4t + 1{,}5143), \qquad (5.8)$$

$$t_{\Phi,\,0,093}(t) = 0{,}3225 + 0{,}10\sin(t + 1{,}75) + 0{,}1526\sin(2t + 1{,}9794) + \\ + 0{,}005\sin(3t + 1{,}5708) + 0{,}0676\sin(4t + 0{,}4595), \qquad (5.9)$$

$$t_{\Phi,\,0,432}(t) = 0{,}8075 + 0{,}4135\sin(t - 0{,}6002) + 0{,}3225\sin(2t - 2{,}6046) + \\ + 0{,}1453\sin(3t + 1{,}6397) + 0{,}3421\sin(4t + 1{,}0399). \qquad (5.10)$$

Следует отметить, что максимальная дилатация резинометаллических пар трения определялась в значительной степени шероховатостью металлических поверхностей. Так, для сопряжений с R_a, равным 0,093 и 0,432 мкм, она составляла 71,5 и 99,0 мкм, соответственно.

Вместе с тем, исследования позволили установить, что полный износ трибосистем прямо пропорционален средней величине амплитуд циклов ($A_{ТИ}$) резинометаллических сопряжений (рис. 5.12).



Рис. 5.12. Зависимость износа модифицированных резинометаллических сопряжений от величины амплитуды циклов термоизносной характеристики: шероховатость стальных валов R_a от 0.093 до 0,675 мкм, нагрузка – 50 Н, скорость – 0,5 м/с, продолжительность испытаний – 7,2 кс.

Это свидетельствует о том, что гармонические ряды (типа 5.3, 5.4), представляющие амплитудные термоизносные характеристики, могут быть использованы для оценки величины износа трибосистем. При этом в качестве предварительного оценочного критерия может выступать среднее за весь период испытаний значение амплитуды циклов, выражающееся первым членом (A_0) соответствующего гармонического ряда.

Для наглядности представления результатов оценки взаимосвязи термоизносных и фрикционных характеристик нами предложен метод «корреляционных квадратов», сущность которого заключается в следующем. В углах квадратов находятся значения амплитуд и длительностей циклов, полученные экспериментально (э) или рассчитанные (р) по соответствующим тригонометрическим многочленам (рис. 5.13 а,б). Стороны квадратов со стрелкой показывают исследуемую пару величин. Степень зависимости между этими величи-

нами характеризуется значением коэффициента корреляции, находящегося на рисунке возле середины каждой стороны квадрата.

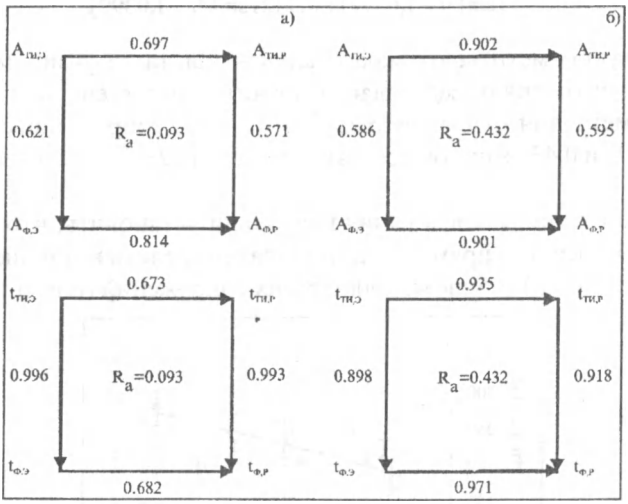


Рис. 5.13. Коэффициенты корреляции экспериментальных (э) и рассчитанных (р) по уравнениям (5.3 – 5.10) значений амплитуд A и длительностей t циклов термоизносной (ТИ) и фрикционной (Ф) характеристик резинометаллических сопряжений: R_a=0,093 (а) и 0,432 (б) мкм.

Анализ данных, приведенных на рис. 5.13, показывает, что коэффициенты корреляции, как правило, больше 0,60, что свидетельствует о существовании довольно сильных связей между исследуемыми величинами. Для трибосопряжений с более шероховатым стальным валом (рис. 5.13 б) абсолютные значения K превосходят значения, полученные для сопряжений с менее шероховатым валом (рис. 5.13 а). При росте шероховатости в 4,65 раза (от 0,093 до 0,432 мкм) было отмечено увеличение среднего коэффициента корреляции примерно на 15 %. Это может свидетельствовать об уменьшении общей погрешности результатов измерений амплитуд и длительностей циклов.

Как уже отмечалось, представленные выше результаты экспериментов были получены с использованием в известной степени произвольного и по этой причине не оптимального числа гармоник (четырех). Вместе с тем, число гармоник влияет на величину коэффициентов корреляции, абсолютные значения которых зависят, в самом общем случае, от степени связи между исследуемыми факторами и совершенства использованных методик измерений. Т. е. путем оптимизации числа гармоник можно получить оптимальные и близкие к

максимальным значения коэффициентов корреляции. Невысокие значения коэффициентов корреляции, в свою очередь, могут свидетельствовать либо о слабой связи между рассматриваемыми величинами, либо о несовершенстве использованных в экспериментах методик измерений.

Как видно из рисунка 5.13, связь между экспериментальными термоизносной и фрикционной характеристиками определяется коэффициентом корреляции, равным 0,621. Этот показатель можно увеличить путем использования приборов, имеющих меньшую погрешность при измерении момента трения, поскольку прибор для измерения линейных параметров трибосистемы – трибодилатометр PCLW-01 (02) имеет, как было показано в главе 2, высокую степень точности. Если при повышении точности измерения момента трения не произойдет увеличения абсолютного значения коэффициента корреляции, то это может свидетельствовать о том, что данная величина достаточно объективно представляет корреляционную связь между исследуемыми параметрами.

С целью определения степени влияния числа гармоник на значения коэффициентов корреляции, были проведены следующие исследования. Число гармоник, использованных для представления экспериментальных данных в виде гармонических рядов типа (5.3–5.10), изменялось от 2 до 10; для каждого числа гармоник определялся коэффициент корреляции между экспериментальными и расчетными значениями. Как и ожидалось (рис. 5.14), с увеличением числа гармоник коэффициент корреляции достигает значения порядка 0,9 уже при числе гармоник, равным 5, а затем, при дальнейшем их увеличении, меняется незначительно.

Следовательно, для увеличения абсолютного значения коэффициента корреляции между экспериментальными и расчетными значениями, полученными с использованием гармонического анализа, целесообразно использовать число гармоник, равное 5. Дальнейшее увеличение числа гармоник практически не изменяет величины коэффициентов корреляции и лишь усложняет расчетную часть экспериментального исследования.

Необходимо отметить, что увеличение абсолютных значений коэффициентов корреляции (рис. 5.14) в конечном счете преследует совершенно определенную цель – повысить достоверность научного исследования путем совершенствования экспериментальных методик измерений и методов аналитического представления полученных данных.

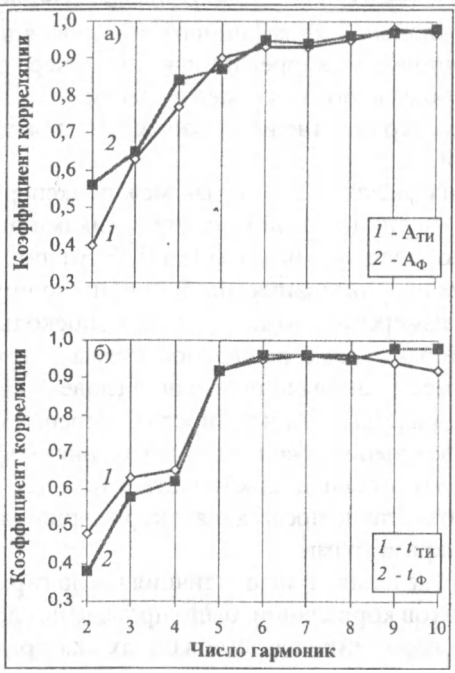


Рис. 5.14. Влияние числа гармоник на абсолютные значения коэффициента корреляции для амплитуд (а) и длительностей (б) циклов: 1, 2 – кривые, относящиеся к термоизносной и фрикционной характеристикам резинометаллических сопряжений, соответственно.

Можно высказать некоторые соображения о предполагаемом механизме трения и изнашивания материалов, обуславливающем циклический характер изменения триботехнических характеристик резинометаллических сопряжений. Вероятно, лучше всего для этих целей использовать представления об изнашивании материалов, развитые в работах Н. М. Алексеева, Н. А. Буше, М. Н. Добычина и др. Существенным недостатком предложенной ими модели является ее полная абстрактность и отсутствие каких-либо численных оценок рассматриваемых параметров поверхностных слоев материалов.

На рис. 5.15 схематически представлена структура фрикционного контакта и ее связь с параметрами, определяемыми в результате трибодилатометрического эксперимента (амплитудой циклов и циклическим износом узлов трения).

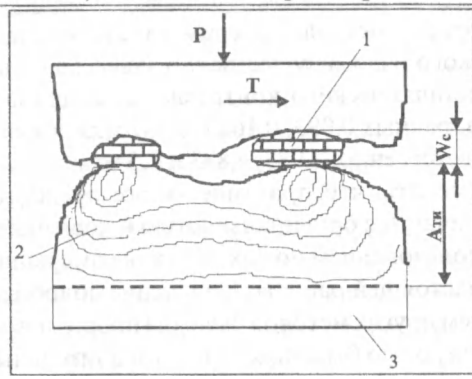


Рис. 5.15. Структура фрикционного контакта: 1 – пограничный слой; 2 – подслой Сен-Венана; 3 – материал основы; P – нагрузка; T – сила трения.

Быстрое изменение линейного размера сопряжения (начало цикла) связано с упругопластической деформацией поверхностного слоя резинового элемента трибосистемы, что подтверждается синхронизированным с дилатацией скачком силы трения. При этом толщина слоя материала, участвующего в процессах деформации, пропорциональна величине амплитуды цикла термоизносной характеристики ($A_{ти}$) и, как показывают представленные выше результаты исследований, может изменяться в пределах от одного до нескольких десятков микрометров. Специфические особенности сопряжения резина – металл, в первую очередь, обусловленные свойствами контактирующих тел, а также данные экспериментов позволяют считать, что практически сразу после стадии деформирования начинается изнашивание поверхностных слоев материалов. Изнашиванию подвергается только часть деформированного объема материалов – пограничный слой (по существу представляющий собой так называемое третье тело), а само явление характеризуется процессами массопереноса как в плоскости фрикционного контакта, так и по нормали к ней. В последнем случае массоперенос происходит между пограничным слоем и остальной частью деформированного поверхностного слоя (подслой Сен-Венана). Цикл завершается при достижении трибосистемой некоторого стационарного состояния, характеризуемого, в первую очередь, толщиной пограничного слоя и подслоя Сен-Венана. Величина износа W_c за цикл фрикционного взаимодействия (испытаний) для резинометаллических трибосистем может достигать нескольких микрометров и составлять примерно от 10 до 20 % общей толщины деформированного слоя материала. Для исследованных

узлов трения резина–металл экспериментально определенная величина циклического износа существенно зависела от шероховатости поверхности металлического контртела. Так, для шероховатостей стального вала, равных 0,093, 0,162 и 0,432 мкм, циклический износ равнялся, соответственно, 2,083, 4,833 и 8,5 мкм.

Следует отметить, что практически все представленные выше результаты отличаются оригинальностью и новизной, так как были получены с использованием новых методик измерений, разработанных в рамках настоящей работы. Получение подобных результатов с использованием других методов было бы просто невозможным или, в крайнем случае, было бы сопряжено со значительными затратами времени и материальных средств.

5.4. Особенности физико-химических явлений в металлополимерных системах

[920, 951, 953]

Узлы трения с полимерными покрытиями представляют собой достаточно сложную металлополимерную систему, характеризующуюся двумя границами раздела металл–полимер. Первая – статическая – образуется в результате, как правило, высокотемпературного формирования полимерного покрытия на поверхности одной из деталей, образующих узел трения. Прочность адгезионных связей покрытия с подложкой во многом определяет долговечность таких узлов трения. Вторая – динамическая – образуется в процессе трения поверхностями полимерного покрытия и другой детали трибосопряжения. Общеизвестно, что в процессе эксплуатации в зоне трения металл–полимер могут генерироваться температуры, превосходящие температуру плавления наиболее легкоплавкого материала пары – полимера.

Как уже отмечалось, физико-химические процессы в зоне фрикционного контакта металл–полимер оказывают в ряде случаев определяющее влияние на свойства материалов, образующих трущуюся пару, и, соответственно, служебные характеристики трибосистем. Более глубокое познание физико-химической природы фрикционного контакта позволит более эффективно управлять его свойствами и обеспечивать надежную эксплуатацию технических устройств, содержащих в своем составе узлы трения.

Исследования физико-химических явлений в металлополимерных системах осуществляли с помощью разработанной методики поля-

рографического анализа, применимого для определения компонентов в интервале концентраций от 10 до 10^{-4} %. Полярографический метод качественного и количественного химического анализа основан на использовании явления деполяризации на одном из электродов электролитической ячейки при электролизе исследуемого раствора.

Исследования проводили на полярографе ППт-1 с датчиком ДП-1 в режиме переменнотокового полярографирования при использовании трапецеидального напряжения, ртутно-капельного электрода и тест-режима регистрации. Испытания проводили при следующих режимах: скорость развертки – 2 мВ/с; амплитуда переменного поляризующего напряжения – от 1 до 48 мВ; период капания – 3 с; задержка импульсов синхронизации – 2,5 с. Потенциалы на полярограммах относили к потенциалу донной ртути электролитической ячейки датчика ДП-1. При определении концентрации исследуемых компонентов применяли метод калибровочных графиков, для построения которых осуществляли полярографирование ряда растворов определяемого компонента с различными известными концентрациями. В качестве фонового электролита использовали соляно-кислый и аммиачно-хлоридный растворы. Метод получения известных растворов, содержащих металл, заключался в термической минерализации полимерных образцов. Минерализацию полимеров осуществляли при температуре около 800 К в течение 3,6 кс в среде воздуха, после чего зольный остаток обрабатывали неорганическими (азотной и соляной) кислотами с последующим их выпариванием на песчаной бане досуха, растворением минеральных остатков фоновым электролитом и анализом полученных растворов. Перед полярографированием из анализируемых растворов удаляли растворенный воздух путем добавки к раствору небольшого количества сульфита натрия. В противном случае, из-за искажения полярограмм было практически невозможно определить высоту получаемых пиков.

Исследования показали, что формирование полимерных покрытий на медных подложках сопровождается диффузией металла в объем полимерного материала (рис. 5.16, 5.17).

Распределение металла по толщине полимерных образцов происходит по зависимости, близкой к экспоненциальной. Для исследованных полимеров продиффундировавшая медь обнаружена на расстоянии до 300 мкм от границы адгезионного контакта полимер–металл. Диффузия металла приводит к существенному изменению свойств поверхностных слоев полимера. Так, диффузия меди в пен-

тапласт вызывает изменение удельного объемного электрического сопротивления полимерного материала (рис. 5.16, кривая 2). Совершенно очевидно, что насыщение полимера металлом скажется и на теплофизических свойствах материалов, в частности, их дилатации. По величине этого показателя полимер, наполненный продиффундировавшим в него металлом, очевидно будет занимать некоторое промежуточное положение между металлом подложки и полимером покрытия и иметь (при прочих равных условиях) несколько меньшую дилатацию по сравнению с исходным полимерным материалом.

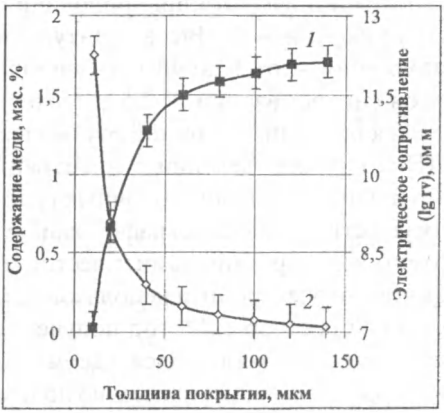


Рис. 5.16. Распределение меди (1) и значения удельного объемного электрического сопротивления (2) по толщине пентапластового покрытия, сформированного при 493 К в течение 0,9 кс.



Рис. 5.17. Распределение меди по толщине покрытий из полиэтилена и полиамида П – 12 (1), полипропилена (2), сформированных при 493 К в течение 1,38, 0,36 и 0,3 кс, соответственно.

Необходимо отметить, что количество металла, продиффундировавшего в покрытие и характер его распределения в значительной

степени зависят от типа используемого полимера и температурно-временных режимов формирования соединений (рис. 5.16–5.18). Например, для пентапластовых покрытий на меди (рис. 5.18 а) максимальному значению прочности адгезионных соединений соответствует минимальное содержание металла, продиффундировавшего в полимер. В случае полиэтиленовых покрытий (рис. 5.18 б) максимальным значениям адгезионной прочности, полученным при оптимальных температурно-временных режимах формирования, соответствует максимальное содержание меди в полимерном покрытии. Можно предположить, что такой характер зависимостей обусловливается способностью диффундирующего металла разупрочнять или упрочнять контактирующие с ним слои полимера.

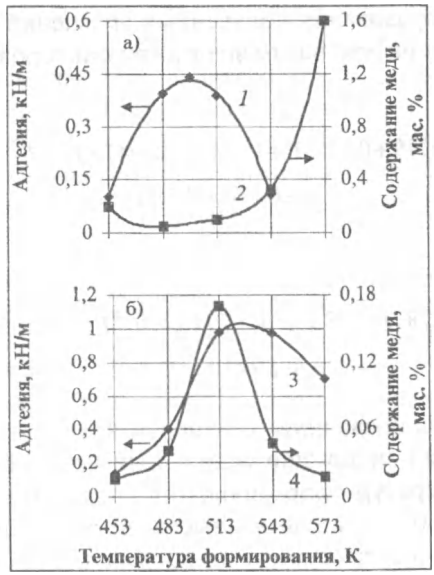


Рис. 5.18. Влияние температуры формирования пентапласта (а) и полиэтилена (б) на адгезионную прочность (1, 3) и содержание меди (2, 4) в поверхностном слое покрытий толщиной 20 мкм.

С использованием метода ротатабельного центрального композиционного планирования эксперимента изучено влияние температуры (X_1) и времени формирования (X_2) на адгезионную прочность соединений и диффузию меди в пентапластовые покрытия. Значения факторов и интервалы их варьирования представлены в таблице 5.2.

Табл. 5.2. Величины и интервалы варьирования независимых переменных

Уровни варьирования	Независимые переменные	
	X_1, (Т, К)	X_2, (t, кс)
Верхнее звездное плечо	553	3.0
Верхний	538	2.64
Основной	503	1.8
Нижний	468	0.96
Нижнее звездное плечо	453	0.6
Интервал варьирования	35	0.84

Обработка экспериментальных данных позволила получить уравнения, адекватно отражающие влияние режимов формирования на адгезионную прочность соединений (y_1) и диффузию меди (y_2) в пентапластовые покрытия.

После преобразования полученных уравнений с кодированными значениями к натуральным значениям факторов, имеем:
для адгезии

$$\sigma_A = -30{,}5719 + 0{,}1258T + 1{,}0043t - 1{,}2947\times10^{-4}T^2 - 0{,}1998t^2 - \\ - 6{,}024\times10^{-4}Tt, \qquad (5.11)$$

для диффузии

$$C = 69{,}4173 - 0{,}2787T - 1{,}8355t + 2{,}7998\times10^{-4}T^2 + 4{,}5068\times10^{-2}t^2 + \\ + 3{,}4989\times10^{-3}Tt. \qquad (5.12)$$

Исследования позволили установить, что на адгезионные свойства пентапласта и диффузию меди в полимер наибольшее влияние оказывает температура формирования покрытий. Из полученных уравнений следует, что оптимальные расчетные значения адгезионной прочности и содержания меди в покрытиях получены практически при одних и тех же температурно-временных режимах формирования: 480 К, 1.7 кс – для адгезии и 488 К, 1,4 кс – для диффузии, т. е. диффундирующая медь оказывает существенное влияние на величину адгезионных связей полимерного покрытия с подложкой. При этом зависимость коэффициента диффузии меди, полученного для температур формирования от 453 до 480 К, достаточно хорошо описывается уравнением

$$D = 18{,}62\times10^{-3}\exp\left(-\frac{4137{,}4}{T}\right), \quad \text{м}^2/\text{с}. \qquad (5.13)$$

Для полиэтиленовых покрытий, сформированных на меди в диапазоне температур от 453 до 510 К, температурная зависимость коэффициента диффузии имеет вид

$$D = 144{,}5 \times 10^{-3} \exp\left(-\frac{8659{,}8}{T}\right), \text{ м}^2/\text{с}. \qquad (5.14)$$

Установленная для исходных полимеров взаимная связь прочности адгезионных соединений и количества продиффундировавшего в покрытие металла была также подтверждена при исследовании диффузии меди в композиционные покрытия на основе смесей пентапласта и полиэтилена.

Разработанная методика исследования диффузии металла в полимерные материалы оказалась пригодной для изучения диффузионных процессов в зоне адгезионного контакта цинк–полимерное (на основе полиэтилена и пентапласта) покрытие.

Время формирования покрытий также оказывает большое влияние на диффузию металла в полимерные материалы. Например, для полиэтиленовых покрытий на меди увеличение продолжительности формирования приводит как к повышению общего количества металла в покрытиях, так и градиента его концентрации по толщине полимерного образца. На глубине 200 мкм от границы адгезионного контакта полиэтилен–медь концентрация продиффундировавшего металла при времени формирования 1,2 и 10,8 кс составляет $8{,}0 \times 10^{-5}$ и $8{,}35 \times 10^{-5}$ моль/л, соответственно. При этом общий характер распределения металла по толщине покрытий для всех времен формирования одинаков и близок к экспоненциальному. Аналогичные результаты были получены при исследовании влияния времени формирования на диффузию меди в пентапластовые покрытия.

Методами электронной растровой микроскопии и рентгеноструктурного анализа показано, что диффузия металла в полимерное покрытие приводит к изменению свойств граничных слоев как полимера, так и металла.

Насыщение пентапластовых покрытий металлом (медью) обусловливает возникновение в граничных слоях полимера значительных перенапряжений, приводящих к разрушению материала. В случае адгезионных соединений это может привести к существенному уменьшению адгезии полимеров к металлам, а в случае фрикционных – к большому износу полимерного элемента трибосопряжений.

Наиболее тяжелые условия работы узлов трения, характеризую-

щиеся высокими нагрузочными и температурными режимами, имеют место при приработке трущихся сопряжений. Именно в этот период следует ожидать наиболее интенсивного протекания диффузионных процессов, оказывающих, по-видимому, определяющее влияние на формирование фактической площади контакта и структуры поверхностных слоев материалов трения.

Повышение скорости скольжения в процессе приработки полиэтиленовых покрытий по меди приводит к увеличению температуры в зоне трения и количества металла, продиффундировавшего в объем покрытия (рис. 5.19). Кинетические кривые изменения температуры трения и содержания металла в покрытии имеют аналогичный характер, однако их анализ позволяет констатировать, что наиболее интенсивная диффузия металла контртела в антифрикционное покрытие наблюдается при значительном повышении температуры в зоне фрикционного контакта тел. Это подтверждают данные, полученные при исследовании диффузии в адгезионных соединениях, о решающем влиянии температуры на диффузионные процессы в металлополимерных системах.

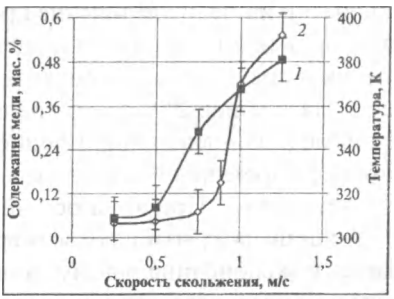


Рис. 5.19. Влияние скорости скольжения при приработке на температуру трения (1) и содержание меди (2) в полиэтиленовых покрытиях; режимы приработки: давление – 1,5 МПа, скорость – от 0,25 до 1,25 м/с.

Диффузия металла контртела в поверхностный слой полимерного покрытия оказывает значительное влияние на антифрикционные характеристики материала. Так, например, для пары медь–полиэтилен наименьший коэффициент трения и наибольшую износостойкость имели полимерные покрытия, приработанные при скоростях 1,0 и 1,25 м/с, т. е. содержащие после приработки наибольшее количество продиффундировавшего металла. Следует отметить, что после фрикционных испытаний полиэтиленовых покрытий, приработанных при различных скоростях относительного скольжения, содер-

жание меди в полимерных образцах оказалось практически одинаковым и составляло примерно 0,08 мас. %. При этом абсолютное содержание металла в покрытиях для скоростей приработки от 0,25 до 0,75 м/с увеличилось, а для скоростей приработки от 1.0 до 1.25 м/с – уменьшилось. Данный факт может быть объяснен наличием некоторого оптимального для данных условий трения содержания металла в покрытиях, позволяющего добиться наилучшей совместимости материалов данного сопряжения и в максимальной степени реализовать их улучшенные триботехнические характеристики.

Фрикционные испытания полимерных покрытий при работе по меди показали, что коэффициент трения у полиэтилена меньше, чем у пентапласта. Оказалось, что после фрикционных испытаний покрытия содержат также и разное количество металла, продиффундировавшего в полимеры при трении: пентапласт – 0,1518 %, полиэтилен – 0,0738 %. Это подтверждают результаты, полученные при исследовании адгезионных соединений этих полимерных материалов с медью, в которых было установлено, что при прочих одинаковых условиях концентрация металла в граничных слоях полиэтилена и пентапласта толщиной 20 мкм составляет 0,259 и 1,74 %, соответственно.

Глубина диффузии меди в покрытие на основе полиэтилена при выбранных режимах фрикционных испытаний имела примерно тот же порядок, что и в адгезионных соединениях – до 200 мкм. Коэффициент диффузии меди при этом находился в пределах от 1,45 до $6{,}6 \times 10^{-11}$ м^2/с. Для температурной зависимости коэффициента диффузии металла (меди) в полиэтиленовое покрытие получено выражение:

$$D = 0{,}912 \exp\left(-\frac{10343{,}6}{T}\right), \text{ м}^2/\text{с}. \qquad (5.15)$$

Величину энергии активации диффузионного процесса определяли графическим методом с использованием уравнения Аррениуса:

$$D = D_0 e^{-\frac{E_a}{RT}},$$

где E_a – энергия активации, кДж/моль; R – универсальная газовая постоянная, R = 8,3143 Дж К$^{-1}$ моль$^{-1}$; T – температура процесса, К.

Расчеты показали, что для фрикционного и адгезионного кон-

тактов полиэтилена с медью энергия активации составляет, соответственно, 86 и 72 кДж/моль. Несколько большие значения энергии активации диффузии у фрикционных соединений по сравнению с адгезионными могут быть связаны с наличием в полимере ориентированного поверхностного слоя, участвующего в трении.

Проведенные исследования позволяют считать, что наиболее вероятным механизмом диффузии металла в полимерные материалы является диффузия через аморфные области и дефекты кристаллической структуры полимеров. В пользу такого предположения свидетельствуют экспериментальные результаты, полученные при исследовании диффузии в адгезионных и фрикционных соединениях пентапласта и полиэтилена, имевших степень кристалличности 26–30 и 70–85 %, соответственно.

По-видимому, в начальный период диффузия происходит по слабым связям – в аморфных областях полимерных материалов. Перенос может осуществляться с участием атомов или ионов металла. На втором этапе, когда эти слабые связи исчерпаны, диффузия протекает через дефекты кристаллической структуры полимеров. В соответствии с этим, энергия активации диффузии для второго этапа должна быть больше, чем для первого.

Необходимо отметить, что установление факта диффузии металла в полимеры и исследование особенностей диффузионного процесса позволяют сделать ряд важных выводов относительно состава и свойств антифрикционных полимерных покрытий. Так, диффузия металла на стадии формирования полимерных покрытий и в процессе их последующего фрикционного взаимодействия может приводить к получению практически полностью наполненного металлом полимера, так как глубина двухсторонней диффузии соизмерима с толщиной покрытий. Оптимальное (с точки зрения количества и характера распределения) диффузионное насыщение полимерных покрытий металлом позволит увеличить электропроводность материалов и практически полностью устранить влияние трибоэлектричества на характеристики трущихся сопряжений. Кроме того, это обеспечит существенное сближение значений коэффициентов теплового расширения материалов, образующих трущуюся металлополимерную пару, и снижение негативного влияния дилатации на триботехнические характеристики сопряжений.

Приведенные выше результаты исследований позволили установить, что термоизносная и фрикционная характеристики резинометаллических сопряжений состоят из периодически повторяющихся

циклов, характеризующихся значениями амплитуд и длительностей их действия. Установлено также, что с ростом амплитуды циклов прямо пропорционально увеличивается и износ трибосопряжений. Вместе с тем, физическая природа циклов, включая процессы, протекающие на поверхностях трения фрикционно взаимодействующих тел, требует своего дальнейшего более углубленного изучения. В частности, представляется достаточно интересным исследование энергетических характеристик поверхностей трения и их связи с циклическим характером изменения параметров трибосистем.

Трибологические испытания резинометаллических сопряжений вал–вкладыш (сталь ШХ-15–резина № 3826) осуществляли на машинах трения СМТ-1, оснащенных трибоанализатором модели PCLW-01. Испытывались два типа сопряжений: одно из которых содержало вкладыш, выполненный из исходной резины, а другое – модифицированный вкладыш, содержащий на рабочей поверхности тонкослойное покрытие из фторопласта-4. В качестве смазочного материала применяли дизельное топливо Л 62. Для оценки энергетических характеристик поверхностей трения с помощью специально разработанного оптического устройства осуществляли измерение краевого угла смачивания с точностью ±1°. Методика расчета поверхностной энергии предусматривала измерение краевого угла смачивания поверхности материалов различными жидкостями при помощи горизонтального микроскопа с угломерной насадкой. Расчет поверхностной энергии и ее составляющих осуществлялся с использованием выражения (5.16):

$$1+\cos\Theta \approx \left[\frac{\left(\gamma_s^d\right)^{1/2}\left(\gamma_l^d\right)^{1/2}}{\gamma_l} + \frac{\left(\gamma_s^h\right)^{1/2}\left(\gamma_l^h\right)^{1/2}}{\gamma_l} \right], \qquad (5.16)$$

где $\gamma_l, \gamma_l^d, \gamma_l^h$ – поверхностное натяжение жидкости и его дисперсионная и полярная составляющие; γ_s^d, γ_s^h – дисперсионная и полярная составляющие поверхностной энергии твердого тела.

Уравнение (5.16) позволяет получить значения γ_s^d, γ_s^h по данным измерений контактных углов Θ двух жидкостей, если значения γ_l, γ_l^d, γ_l^h обеих жидкостей известны.

В работе использовались следующие жидкости: вода дистиллированная ($\gamma_l = 72{,}8\times10^{-5}$ Дж/м^2; $\gamma_l^d = 21{,}8\times10^{-5}$ Дж/м^2; $\gamma_l^h = 51{,}0\times10^{-5}$ Дж/

м²) и глицерин (γ_l = 63.4x10⁻⁵ Дж/м²; γ_l^d = 37x10⁻⁵ Дж/м²; γ_l^h = 26,0x10⁻⁵ Дж/м²).

Проведенные эксперименты позволили установить существование прямо пропорциональных (линейных) зависимостей между значениями поверхностной энергии резинового вкладыша и амплитудой циклов термоизносных характеристик узлов трения (рис. 5.20).

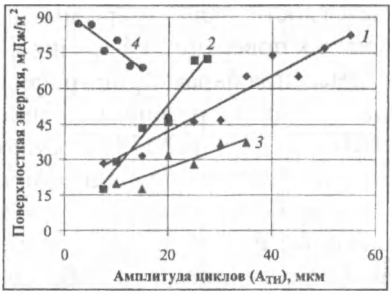


Рис. 5.20. Зависимость поверхностной энергии резинового вкладыша от амплитуды пиков термоизносной характеристики исходных (1, 3) и модифицированных (2, 4) резинометаллических трибосопряжений, испытанных при давлении 0,35 МПа и скорости 0,6 м/с (1, 2) и 0,25 МПа и скорости 0,5 м/с (3, 4).

Ужесточение режимов испытаний трибосистем с исходными резиновыми вкладышами (рис. 5.20, графики 1,3) принципиально не изменяет характер зависимости $E = f(A)$ – значения поверхностной энергии увеличиваются с ростом амплитуды циклов. При этом отмечено также увеличение абсолютных значений поверхностной энергии образцов. Это представляется в известной степени логичным, так как повышение нагрузочно-скоростных режимов работы трибосистем обусловливает при постоянном времени испытаний более высокие значения их линейного износа.

Для модифицированных резинометаллических сопряжений (рис. 5.20, графики 2, 4) получены несколько отличающиеся (от исходных) результаты. Пожалуй, сохранился прежним только общий линейный характер полученных зависимостей. При менее жестких режимах испытаний установлено снижение значений поверхностной энергии резиновых образцов с ростом значений амплитуды циклов дилатометрических характеристик. Более жесткие режимы испытаний приводят к изменению характера зависимости $E = f(A)$ – поверхностная энергия увеличивается с ростом амплитуды циклов. Это может являться свидетельством существования оптимума (минимума) на

зависимости износа (поверхностной энергии) от скорости и нагрузки и безусловно связано с тем влиянием, которое оказывает на триботехнические характеристики систем фторопластовое покрытие. Следует отметить еще одно интересное обстоятельство. Графики 1 и 2 на рис. 5.20 имеют общую точку. Это может быть свидетельством в пользу высказанного выше предположения. Модифицированные фторопластом резиновые образцы сохраняют улучшенные триботехнические характеристики по сравнению с исходными резиновыми образцами, только в ограниченной области зависимости $E = f(A)$, т. е. до точки пересечения графиков 1 и 2. При более высоких значениях амплитуд (за точкой пересечения) трибосопряжения имеют более высокие значения поверхностной энергии и, соответственно, меньшую износостойкость.

Результаты экспериментов позволяют предположить, что в общем случае зависимость поверхностной энергии от амплитуды циклов термоизносной характеристики имеет вид кривой с экстремумом, а его положение зависит как от свойств фторопластового покрытия, например, толщины или состава, так и от нагрузочно-скоростных режимов испытаний трибосопряжений. Примечательно, что в области малых амплитуд левая часть графика 2 располагается ниже графика 4 (рис. 5.20). Это может свидетельствовать о том, что для модифицированных покрытий также существует некоторый оптимум нагрузочно-скоростных режимов испытаний, обеспечивающий минимальные значения поверхностной энергии и износа резинометаллических пар трения.

Для объяснения циклического характера изменения термоизносных характеристик целесообразно, кроме общих значений поверхностной энергии, использовать ее составляющие: дисперсионную и полярную компоненты. В таблице 5.10 представлены результаты измерений поверхностной энергии и ее составляющих для исходных и модифицированных образцов, выполненные на стационарных участках и вершинах циклов термоизносных характеристик (см. рис. 5.7). Как для исходной, так и для модифицированной резины значения поверхностной энергии в вершинах циклов превышают значения энергии для стационарных участков в среднем от 15 до 18 %.

Можно предположить, что это может быть связано с разным уровнем дефектности структуры материала, а также особенностями физико-химических процессов, протекающих в тонких поверхностных слоях материалов образцов при трении. В пользу этого предположения, в частности, свидетельствуют более высокие значения поляр-

ной компоненты поверхностной энергии в вершинах циклов по сравнению с аналогичными значениями, измеренными на стационарных участках термоизносных характеристик. Для исходной резины разница этих значений составила 23 %, а для резины с фторопластовым покрытием – 10,5 %. Более низкие значения в последнем случае объясняются экранированием поверхностей трения вала и вкладыша тонкими фторопластовыми пленками переноса и, как следствие, снижением интенсивности физико-химического взаимодействия в системе резина–металл.

Табл. 5.3. Значения поверхностной энергии резиновых образцов, измеренные в разных точках термоизносной характеристики

Поверхностная энергия и ее составляющие, мДж/м²	Резина № 3826		Резина № 3826 с покрытием из Ф-4	
	т. 1	т. 2	т. 1	т. 2
Дисперсионный компонент	4,7	4,13	2,05	5,4
Полярный компонент	31,4	38,67	65,76	72,7
Поверхностная энергия	36,1	42,7	67,81	78,1

Примечание. Нагрузка – 50 Н, скорость – 0,5 м/с.

О преобладающем влиянии физико-химических процессов на триботехнические характеристики резинометаллических сопряжений свидетельствует также то, что вклад полярной компоненты в общее значение поверхностной энергии составляет для исходной резины 90,5 % и для модифицированной – 93 %.

Проведенные расчеты показали, что значения полярной и дисперсионной составляющих поверхностной энергии прямо пропорциональны амплитуде циклов дилатометрических характеристик резинометаллических узлов трения (рис. 5.21 а, б).

Для исходных резиновых образцов значения полярной составляющей, независимо от значений, использованных в экспериментах нагрузочно-скоростных режимов, линейно возрастают при увеличении амплитуды циклов. При этом большие значения энергии соответствуют более жестким режимам испытаний (рис. 5.21 а, графики 1, 2). Дисперсионная составляющая поверхностной энергии для исходных резиновых вкладышей, в зависимости от режимов испытаний сопряжений, может практически не изменяться или даже уменьшаться при повышении амплитуды циклов (рис. 5.21 б, графики 1, 2). Однако следует еще раз отметить, что вклад дисперсионной составляющей в общую величину поверхностной энергии исследуемых образцов не превышает нескольких процентов.

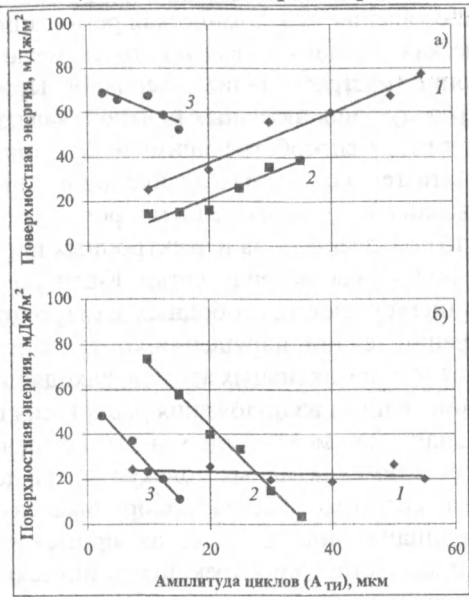


Рис. 5.21. Зависимость полярной (а) и дисперсионной (б) составляющих поверхностной энергии резинового вкладыша от амплитуды пиков термоизносной характеристики исходных (1, 2) и модифицированных (3) резинометаллических сопряжений; режимы испытаний: давление – 0,35 МПа, скорость – 0,6 м/с (1) и 0,25 МПа и 0,5 м/с (2, 3).

Полярная и дисперсионная составляющие резиновых вкладышей с полимерным покрытием имеют тенденцию к уменьшению при увеличении амплитуды циклов дилатометрических характеристик (рис. 5.21, графики 3).

В дополнение к вышеизложенному, можно высказать некоторые соображения общего порядка относительно природы физико-химических явлений, протекающих в зоне фрикционного контакта. Эти соображения могут быть использованы при разработке как теоретических основ трибохимии, так и эффективных методов управления триботехническими характеристиками узлов трения.

Если под физико-химическими процессами понимать весь комплекс явлений, протекающих в статическом высокотемпературном (адгезионном) и динамическом (фрикционном) контактах тел, а также использовать фундаментальные представления о разрушении и трибохимии, то есть основания считать, что на триботехнические свойства сопряжений, в том числе и резинометаллических, оказыва-

ют влияние такие явления, как химическая релаксация, химическое течение, статическая и динамическая усталость, механическая активация, коррозионное растрескивание материалов. При этом возможно образование следующих активных центров, являющихся полярными соединениями или способствующими их созданию в зоне фрикционного контакта тел: свободных радикалов и ионов, возникающих при разрыве ковалентных связей в макромолекулах; ион-радикалов; *F* и *F'*-центров–электронов и электронных пар, захваченных отрицательной ионной вакансией решетки; *V*-центров–положительных ионных вакансий решетки; свободных электронов, эмиттирующих при разрушении тел или нарушении контакта тел с различной электронной плотностью; активных атомов, находящихся на гранях и дефектах или смещенных из положения равновесия в местах, в которых значительная часть межатомных сил не компенсирована взаимодействием с соседями; активных молекул – при декомпенсации межмолекулярных сил, в том числе и водородных связей; вакансии аддендов в координационных комплексах; промежуточных активных состояний, предшествующих крекингу химических связей и образованию свободных радикалов; прочих типов активных центров и состояний, например, магма-плазмы. Определение видов активных центров и образуемых ими активных групп и соединений применительно к конкретным трибосистемам, например, рассмотренным в настоящем исследовании, требует дополнительного привлечения современных научных методов и технологий.

Не вызывает сомнений существование связей между поверхностной энергией, качественно-количественными параметрами полярных групп (соединений) и циклическим характером изменения дилатометрических характеристик сопряжений. Вполне возможно, что цикличность обусловлена образованием в зоне фрикционного контакта тел некоторой предельной концентрации полярных групп, последующим их адгезионным взаимодействием с металлическим контртелом и интенсивным изнашиванием (уносом из зоны трения) приповерхностного слоя испытываемого материала. Логично предположить, что этот процесс может происходить на фоне общей структурной перестройки поверхностей контактирующих тел; трансформация структуры может быть также и основным фактором, обуславливающим цикличность характеристик трибосопряжений. Требует также своей дальнейшей проверки гипотеза о связи цикличности термоизносных и фрикционных характеристик с толщиной смазочного слоя в трибосистемах.

ГЛАВА 6. ИЗНАШИВАНИЕ И ДИЛАТАЦИЯ ЭПИЛАМИРОВАННЫХ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ

Нанесение тонких пленок на поверхности трения является высокоэффективным технологическим приемом снижения коэффициента трения и повышения износостойкости сопряжений. Перспективным является использование для этих целей антифрикционных защитных пленок, состоящих из определенным образом ориентированных органических молекул, полученных в результате адсорбции из эпиламирующих составов, представляющих собой растворы фторсодержащих поверхностно-активных веществ (ПАВ) [585]. К важнейшим особенностям подобного класса соединений следует отнести повышенную хемо- и теплостойкость, а также высокую поверхностную активность не только в полярных, но и в не полярных средах. Такие покрытия, практически не оказывая сколько-нибудь заметного влияния на геометрические размеры узлов трения, в том числе и прецизионных, вместе с тем, позволяют существенно снизить материальные (износ) и энергетические (трение) потери в процессе их работы.

Трибосистемы с эпиламированными рабочими поверхностями представляют собой уникальный объект для исследований, в первую очередь, благодаря их сверхмалой толщине, которая в зависимости от вида эпиламирующего состава, технологии формирования покрытия, вида покрываемого материала и ряда других факторов может составлять доли микрометра. Совершенно очевидно, что непрерывные (т. е. без разборки) испытания эпиламированных узлов трения с использованием разработанных методик и оборудования позволят получить новые экспериментальные данные, глубже понять природу процессов их трения и изнашивания и на этой основе разработать способы эффективного использования в различных отраслях народного хозяйства страны.

Следует отметить, что служебные свойства антифрикционных пленок эпилама в значительной степени зависят от условий и режимов контактного взаимодействия. Практически мало изученными являются вопросы управления триботехническими характеристиками сопряжений методом эпиламирования, включая влияние технологической наследственности, конструкции и вида материалов, использованных для изготовления трибосистем, особенностей физико-химических процессов в эпиламированных узлах трения. Следует

подчеркнуть, что связь этих вопросов с изнашиванием и дилатацией трибосистем представляется совершенно очевидной.

6.1. Влияние технологической наследственности на изнашивание и дилатацию эпиламированных узлов трения

[921, 923, 924, 926, 945]

Эпиламирование – технология по своей сути во многом аналогичная другим триботехнологическим методам, заключающимся в нанесении на рабочие поверхности деталей антифрикционных защитных покрытий. Обработка деталей эпиламирующими составами предусматривает выполнение ряда последовательных операций: предварительную подготовку поверхностей, заключающуюся в придании им требуемых механических и топографических свойств, и последующей очисткой (обезжириванием) в органических растворителях; сушку на воздухе для удаления остатков растворителя; непосредственно нанесение эпилама; термообработку покрытий; контроль качества покрытий и по необходимости нанесение на поверхность обработанного изделия слоя консервирующего материала.

Все операции технологического процесса эпиламирования и режимы их осуществления оказывают существенное влияние на эксплуатационные характеристики обрабатываемых деталей. Это влияние, часто называемое технологической наследственностью, по отношению к триботехническим характеристикам покрытий эпилама практически не изучено.

Анализ априорной информации позволил установить, что одними из важнейших факторов, оказывающих влияние на свойства эпиламированных поверхностей, являются температурно-временные режимы формирования покрытий. Для оценки влияния режимов эпиламирования пары сталь (сталь 45)–бронза (Бр О5Ц5С5) на триботехнические свойства покрытий использовался полный факторный эксперимент. В качестве факторов были выбраны температурно-временные режимы обработки и сушки (термообработки) деталей сопряжения (табл. 6.1). Испытания проводились на машине трения 2070 СМТ-1 при нагрузке 5 МПа и линейной скорости 0,4 м/с в течение 0,9 кс. Эпиламированию подвергался только стальной элемент трущейся пары. В качестве эпиламирующих составов использовали смазочные композиции 6 СФК-180-05 или 6 СФК-180-20 (ТУ 6-02-1229-82), представляющие собой раствор перфторполиэ-

фиркислоты 6 МФК-180 (ТУ 6-02-2-610-80), являющейся поверхностно-активным веществом, в хладоне 113 (ГОСТ 23844-79) концентрацией, соответственно, 0,5 или 2,0 мас. %. Использованные эпиламы представляли собой подвижные легколетучие прозрачные жидкости желтоватого цвета без механических примесей и воды с температурой кипения 47,3°С (320,3 К) и плотностью 1570–1590 кг/м^3.

Смазывание пар осуществлялось погружением нижней части вала в ванну с осевым маслом. В качестве контролируемого параметра был выбран линейный износ трущейся пары.

Табл. 6.1. План эксперимента по оптимизации температурно-временных режимов процесса эпиламирования

Уровень варьирования	Температура эпиламирования, К	Продолжительность эпиламирования, кс	Температура термообработки, К	Продолжительность термообработки, кс
Код	X_1	X_2	X_3	X_4
Основной уровень (0)	–	2,76	408	5,4
Интервалы варьирования	–	2,64	115	5,1
Верхний уровень (+1)	320	5,40	523	10,5
Нижний уровень (-1)	293	0,12	293	0,3

Статистическая обработка результатов испытаний позволила определить дисперсию опыта $S^2_{\{y\}}$ = 194,9, проверить однородность ряда дисперсий с помощью критерия Кохрена (G^p = 0,167 < G^m = 0,47), определить доверительный интервал коэффициентов регрессии Δb_i = ±3,94.

В окончательном виде полученное уравнение регрессии в кодированных значениях имеет вид:

$$Y = 55{,}61 + 10{,}74X_1 - 12{,}93X_2 + 8.64X_3 + 5{,}77X_1X_2.$$

Уравнение адекватно описывает связь между линейным износом бронзового вкладыша и температурно-временными режимами эпиламирования стального ролика.

Анализ полученного уравнения позволил установить, что эпиламирование и последующую термообработку покрытий целесообразно проводить при комнатной температуре при максимально возможной (по результатам экспериментов) продолжительности обработки материалов. Однако на увеличение продолжительности эпи-

ламирования, в ряде случаев, накладываются ограничения, например, технико-экономического характера. Одним из таких ограничений может быть время нахождения машины или отдельного ее агрегата в ремонте. Для интенсификации (уменьшения продолжительности) процесса эпиламирования можно использовать энергию ультразвуковых колебаний. Наилучшие результаты в этом случае получены после обработки эпиламом стального вала при комнатной температуре в ультразвуковом поле частотой 22 кГц (рис. 6.1).

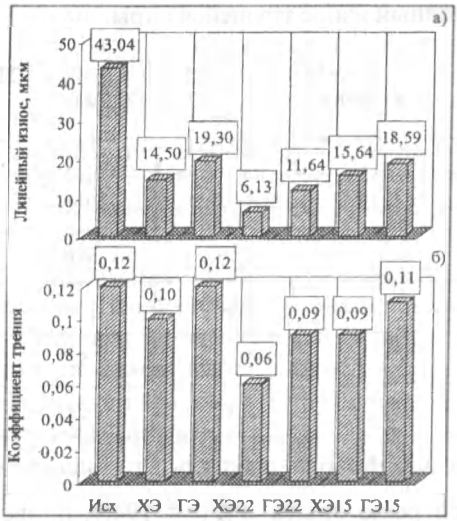


Рис. 6.1. Влияние способа эпиламирования на линейный износ (а) и коэффициент трения (б) сопряжения сталь–бронза: Исх – исходные сопряжения (не эпиламированные); ХЭ, ГЭ – эпиламированные, соответственно, при температуре 293 К (холодное) и 320,3 К (горячее); ХЭ15, ХЭ22, ГЭ15, ГЭ22 – эпиламирование в ультразвуковом поле частотой 15 и 22 кГц.

После такой обработки износ сопряжений сталь–бронза уменьшился практически в 7 раз, а коэффициент трения – в 1,7 раза.

С увеличением продолжительности эпиламирования стального вала в ультразвуковом поле коэффициент трения, износ стального вала и бронзового вкладыша уменьшаются (рис. 6.2). При этом характер изменения коэффициента трения и износ вала описываются зависимостями, близкими к линейной. Наиболее заметное снижение износа бронзового вкладыша наблюдается после обработки стального вала в течение 1,2–1,3 кс. Дальнейшее увеличение времени эпи-

ламирования, по-видимому, нецелесообразно по соображениям технического и экономического характера.



Рис. 6.2. Влияние продолжительности эпиламирования в ультразвуковом поле на триботехнические характеристики сопряжений сталь-бронза: 1 – коэффициент трения; 2 – линейный износ вкладыша; 3 – линейный износ вала.

Улучшение триботехнических свойств материалов при эпиламировании в ультразвуковом поле может быть связано как с более качественной очисткой покрываемой поверхности, так и тем, что молекулы эпилама более плотным слоем покрывают обработанную поверхность, заполняют все трещины и впадины, откуда впоследствии и происходит восстановление нарушенного в процессе трения покрытия.

6.2. Трение и изнашивание эпиламированных металлических сопряжений

[921, 923, 924, 926, 937, 943, 945, 973, 975]

Металлические узлы трения, как правило, имеют конструкцию, предусматривающую возможность использования различных по своим свойствам материалов. Для узлов трения скольжения характерен контакт более твердого, чаще всего стального или чугунного вала с более мягким вкладышем, изготавливаемым из бронз, латуней, алюминиевых сплавов и т. п. Для узлов трения качения наиболее часто используемым и, по-видимому, основным на сегодняшний день, является контакт двух твердых материалов, изготовленных из стали, керамики, некоторых других твердых и сверхтвердых композитов. Триботехнические характеристики как узлов трения скольжения, так и качения зависят от большого числа факторов: вида контактирующих материалов, способа смазывания и используемых при этом сма-

зочных композиций, технологических особенностей обработки поверхностей трения эпиламирующими составами и др. Исследования в этих направлениях позволят глубже понять механизмы трения и изнашивания тонких пленок и предложить эффективные методы управления триботехническими характеристиками узлов трения с помощью метода эпиламирования.

Исследование изнашивания сопряжений сталь (Ст45)–бронза (О5Ц5С5) осуществляли на машине трения СМТ-1 при смазывании пар трения методом погружения нижней части вала в ванну с осевым маслом. Эпиламирование производили композицией 6 СФК-180-05 в течение 54 кс и последующей сушкой на воздухе в течение 3,6 кс. Узлы трения перед обработкой эпиламом предварительно прирабатывались в условиях, аналогичных условиям последующих испытаний (K_{PV}=1). В процессе испытаний фиксировали линейный износ, коэффициент и температуру трения смазочного материала (рис. 6.3).

Исследования показали, что обработка эпиламом позволяет существенно снизить тепловыделение в трущемся сопряжении и повысить его износостойкость. После завершения испытаний износ металлических пар был примерно в 4 раза больше износа пар трения с эпиламированным стальным валом. Для этих же узлов температуры смазочного масла к моменту окончания испытаний составляли, соответственно, 408 и 353 К. Таким образом, эпиламирование позволило существенно улучшить триботехнические характеристики данного узла. Наибольшая эффективность процесса эпиламирования имела место в случае обработки только наиболее твердого элемента трибосистемы – стального вала. Отсутствие значительного положительного эффекта при эпиламировании только бронзового вкладыша может быть объяснено большой разницей значений поверхностной энергии обоих контактирующих тел и специфическими особенностями физико-химического взаимодействия в зоне их фрикционного контакта.

По-видимому, способность пленок эпилама снижать поверхностную энергию твердых тел может являться определяющим фактором при назначении оптимального вида технологической обработки деталей трения. При этом следует учитывать не только природу обрабатываемых материалов, но и температурно-временные режимы их последующей термообработки.

Последние в значительной степени могут влиять на энергетические характеристики поверхностей как через структуру покрытий эпи-

лама, так и через непосредственно связанные с ней физико-химические процессы в зоне контакта металл–эпилам.

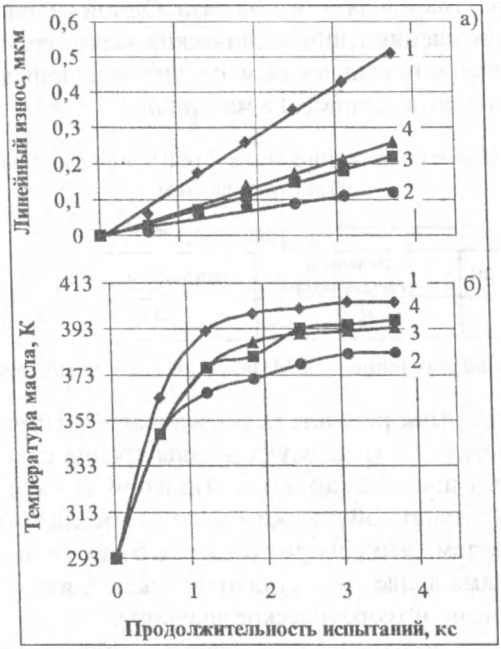


Рис. 6.3. Триботехнические характеристики пары трения стальной вал–бронзовый вкладыш, подвергнутой разным видам обработки:
1 – исходные образцы; 2 – вал эпиламирован; 3 – вал и вкладыш эпиламированы; 4 – вкладыш эпиламирован.
Условия испытаний: P = 4,0 МПа, v = 1,0 м/с, t = 3,6 кс.

Некоторые сопряжения машин, например, моторно-осевые подшипники локомотивов, работают в условиях подачи смазочного материала в зону трения при помощи польстерного элемента (фитиля). Эксперименты, проведенные на машине трения Т-05, и в этом случае показали высокую эффективность избирательного (стального вала) эпиламирования деталей трущегося сопряжения (табл. 6.2).

Использование системного анализа в проводимых исследованиях позволило предложить и другой эффективный способ улучшения триботехнических характеристик узлов трения, содержащих в своем составе пористые материалы, например, фитильные элементы. Сущность способа заключается в эпиламировании польстерного элемента (фитиля) пары трения. После такой избирательной обработки из-

нос вала снизился в 2,44 раза, вкладыша – в 5,95 раза, суммарный износ пары – в 4,10 раза, коэффициент трения уменьшился в 4,10 раза, а температура масла – в 2,03 раза. Одной из наиболее вероятных причин улучшения триботехнических характеристик таких сопряжений является повышенная маслоудерживающая способность фитильного элемента (пористого материала).

Табл. 6.2. Износ сопряжений сталь–бронза при фитильной смазке пары трения, мкм

Вид обработки			
Исходные образцы	Вкладыш эпиламирован	Вал эпиламирован	Вал и вкладыш эпиламированы
6,68	10,07	3,86	8,89

Условия испытаний: давление – 4 МПа, скорость – 1 м/с, время – 3.6 кс.

Приведенные выше результаты исследований (например, рис. 6.3) свидетельствуют, что в ряде случаев узлы трения сохраняют улучшенные триботехнические характеристики при достаточно больших (по сравнению с толщиной пленки эпилама) абсолютных значениях износа трибосистем. Это говорит о том, что оценка долговечности покрытий эпилама является актуальной задачей, имеющей не только практическое, но и теоретическое значение.

Исследование долговечности пленок эпилама осуществляли на парах сталь–бронза в условиях трения без смазочного материала. Испытания проводились на машинах трения СМТ-1 с трибоанализатором PCLW-01 по схеме вал (ШХ-15) – вкладыш (О5Ц5С5) при давлениях 0,25 и 0,34 МПа и линейной скорости, изменяемой от 0,20 до 0,47 м/с. Испытания проводили при трении без смазочного материала. Обработка стального вала эпиламом в течение 0,6 кс и сушка покрытий осуществлялись при комнатной температуре. Предельную долговечность эпиламированных пар трения характеризовали временем стабильного (не менее 0,6 кс) и заметного отклонения (излома) термоизносной характеристики от своих установившихся в заданных условиях трения значений, что может служить однозначным доказательством нарушения нормального режима функционирования трибосистемы. Подобного рода испытания принципиально стали возможны лишь после разработки методик трибодилатометрических измерений, предусматривающих использование разработанной конструкции трибоанализатора PCLW-01.

Установлено, что долговечность узлов трения в значительной степени зависит от нагрузочно-скоростных режимов испытаний трибосопряжений (рис. 6.4).

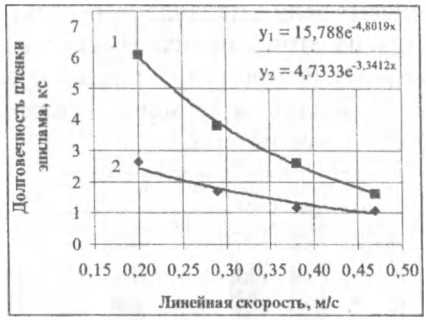


Рис. 6.4. Долговечность покрытий эпилама в зависимости от нагрузочно-скоростных режимов испытаний трибосопряжений:
1, 2 – давление 0,25 и 0,34 МПа, соответственно.

Долговечность покрытий эпилама от скорости испытаний узлов трения изменяется по зависимости, близкой к экспоненциальной. Так, при увеличении скорости скольжения с 0,2 до 0,47 м/с при постоянном давлении 0,25 МПа долговечность пленки уменьшается с 6,0 до 1,66 кс, т. е. в 3,7 раза. В свою очередь, изменение давления с 0,25 до 0,34 МПа при постоянной скорости скольжения 0,29 м/с привело к уменьшению долговечности эпиламированного трибосопряжения с 3,83 до 1,67 кс, т. е. в 2,29 раза.

Экспоненциальный характер изменения долговечности покрытий эпилама от скорости испытаний трибосопряжений позволяет предположить, что механизм разрушения пленок имеет термоактивационный характер, для выяснения особенностей которого может быть использовано известное уравнение кинетической природы прочности твердых тел:

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}, \qquad (6.1)$$

где τ – долговечность материала под нагрузкой; γ – коэффициент; σ – напряжение разрывное; U_0 – энергия активации разрушения; k – постоянная Больцмана; T – температура.

Трибомеханические системы, в которых процесс трения реализуется между двумя близкими по своим физико-механическим свойствам материалам (сталями, чугунами и др.), являются достаточно

распространенными на транспорте, в сельхозмашиностроении и ряде некоторых других отраслей народного хозяйства. Для улучшения триботехнических характеристик такого типа узлов трения (поршневых колец, шлицевых валов, цилиндровых гильз и др.) на их рабочие поверхности при изготовлении или восстановлении наносят покрытия на основе хрома. Вследствие этого исследование износостойкости обработанных эпиламом хромовых покрытий представляет несомненный практический интерес.

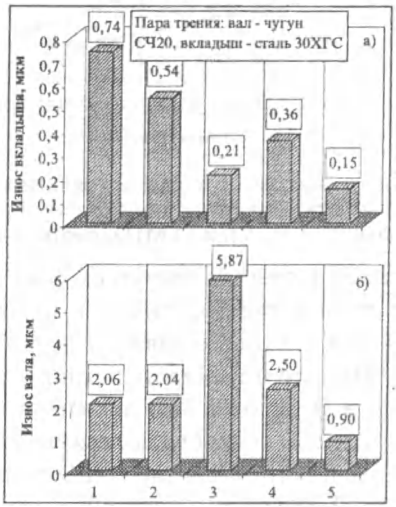


Рис. 6.5. Износ деталей пар трения при различных способах обработки их рабочих поверхностей: 1 – исходная пара; 2 – эпиламированный вкладыш; 3 – хромированный вкладыш; 4 – хромированный эпиламированный вкладыш; 5 – эпиламированный вал и хромированный эпиламированный вкладыш.

Износные испытания проводили на машинах трения СМТ-1 с трибоанализатором PCLW-01 по схеме вал–вкладыш. Материал вала – чугун СЧ20, вкладыша – сталь 33ХГС. В экспериментах использовали исходные (стальные) и хромированные вкладыши. Сравнивались результаты испытаний как исходных пар трения, так и пар трения, в которых контактирующие элементы подвергались обработке эпиламом. Смазывание сопряжений осуществлялось погружением нижней части вала в ванну с дизельным маслом М-14Б.

Из представленных данных (рис. 6.5) следует, что хромирование вкладыша более чем в 3 раза снижает его износ, однако примерно в такое же количество раз увеличивает износ вала. Наибольшую изно-

состойкость имели эпиламированные сопряжения с хромированным вкладышем. По сравнению с исходной парой износ вала уменьшился в 2,3 раза, а вкладыша – в 5 раз.

Исследования фрикционных характеристик сопряжений типа вал (сталь)–втулка (сталь) показали, что эпиламирование не только снижает абсолютное значение пускового момента трения, но и делает его более стабильным. Это, в свою очередь, уменьшает дилатацию узлов трения и повышает их износостойкость.

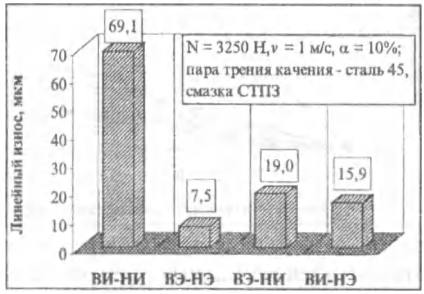


Рис. 6.6. Износ модельных стальных пар трения качения в зависимости от вида обработки деталей трения: ВИ, НИ – верхний и нижний образцы не обработаны; ВЭ, НЭ – эпиламированные образцы.

Испытания модельных пар трения качения (ролик–ролик) со смазкой СТПЗ, изготовленных из стали 45, подтвердили высокую эффективность эпиламирования деталей трущихся сопряжений (рис.6.6). Испытания проводили на машинах трения СМТ-1; смазывание пар – одноразовое; продолжительность испытаний – 0,78 кс, величина проскальзывания контактирующих поверхностей – 10 %.

Аналогичные результаты были получены и в случае длительных износных исследований стальных пар трения (рис. 6.7). После завершения испытаний износ полностью эпиламированной пары был примерно в 6 раз меньше износа исходной пары трения.

Подшипники качения машин работают, как правило, в условиях высоких удельных контактных нагрузок и частот вращения (в большинстве случаев с изменением абсолютных значений и направления движения), достаточно жестких температурных режимов, когда окружающая их среда содержит самые разнообразные коррозионноактивные вещества, абразивные частицы и др.

Тенденции развития современной техники, предназначенной для использования в самых различных областях жизнедеятельности человека, предъявляют еще более высокие требования к снижению по-

терь на трение и интенсивность изнашивания подшипников качения. Особенно актуальны эти требования для прецизионных подшипников, получающих все большее применение в узлах трения качения транспортной, аэрокосмической и военной техники, некоторых других видов специальных технических средств.



Рис. 6.7. Зависимость линейного износа от времени испытаний и вида обработки деталей модельных пар трения качения:
1 – образцы не обработаны; 2 – верхний ролик эпиламирован;
3 – нижний ролик эпиламирован; 4 – эпиламированы оба ролика.
Смазочный материал – СТПЗ.

Несмотря на значительные успехи, достигнутые в повышении трибологической надежности подшипников качения путем совершенствования их конструкций, технологии изготовления и ремонта, а также оптимизации условий эксплуатации, по-прежнему, одним из основных остается так называемое технологическое направление. Как уже отмечалось, эпиламирование на сегодняшний день является одной из наиболее эффективных триботехнологий.

Испытания натурных подшипников качения могли бы подтвердить или опровергнуть данные, полученные при испытаниях модельных узлов трения. Для изучения этого вопроса были проведены специальные эксперименты.

Трибологические испытания исходных (серийных) и эпиламированных подшипников проводили на машинах трения СМТ-1. В качестве объекта исследований использовали натурные подшипники качения типа 303К2. Модифицирующую обработку элементов (частей) подшипников проводили при 293 К в течение 54 кс с последующей термообработкой покрытий при 423 К в течение 7,2 кс. Для оценки износа использовали трибодилатометр PCLW-01 с индикатором часового типа, имеющим цену деления 2 мкм. Для каждого режима

было подвергнуто испытаниям пять подшипников качения с последующей статистической обработкой полученных данных. Сравнительной оценке подвергались исходные (обозначены на рисунках цифрой 1) и эпиламированные (цифры 2, 3 – обработка, соответственно в 0,5 и 2,0 % эпиламирующих составах 6 СФК-180) подшипники качения.

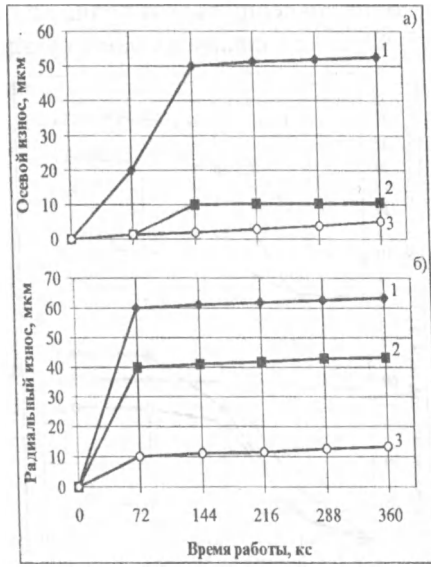


Рис. 6.8. Осевой (а) и радиальный (б) износ подшипников качения 303К2: 1 – исходный подшипник; 2, 3 – подшипники обработаны эпиламом 6 СФК-180-05 и 6 СФК-180-20, соответственно.
Условия испытаний: N = 2000 Н, ω = 16,7 $с^{-1}$, смазочный материал – ЖРО.

Проведенные испытания показали, что осевые износы исходных подшипников качения, смазываемых пластичным смазочным материалом ЖРО, от 1,5 до 6 раз больше, чем эпиламированных (рис. 6.8). Использование для смазки подшипников смазочного материала ЖРО, содержащего 5 мас. % абразивной среды (кварцевый песок дисперсностью от 250 до 500 мкм), несколько снижает эффективность модифицирующей обработки (рис. 6.9). В обоих случаях (рис. 6.8, 6.9) приработка подшипников завершалась в период от 72 до 108 кс после начала испытаний.

Обработка эпиламом позволила снизить момент трения (а, следовательно, и тепловыделение) подшипников качения в усло-

виях установившегося движения для пластичных смазок ЖРО – в 2,3, ВНИИ НП 232 – в 1,7 и ЦИАТИМ-201 – в 1,2 раза.

Кроме того, как это следует из представленных на рис. 6.10 данных, эпиламирование обеспечило: снижение до 70 % абсолютных значений коэффициентов сопротивления качению подшипников; расширение и смещение минимальных значений коэффициента в область более высоких значений частот вращения: от 3,5–4,0 $с^{-1}$ для исходных и до 7,5–8,5 $с^{-1}$ для эпиламированных узлов трения.

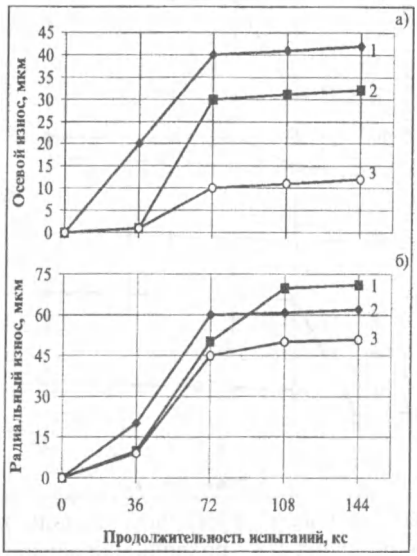


Рис. 6.9. Осевой (а) и радиальный (б) износ подшипников качения 303К2: 1 – исходный подшипник; 2, 3 – подшипники обработаны эпиламом 6 СФК-180-05 и 6 СФК-180-20, соответственно. Условия испытаний: N = 2000 Н, ω = 16,7 $с^{-1}$, смазочный материал – ЖРО+5,0 мас. % абразивной среды (кварцевый песок).

Таким образом, испытания натурных подшипников подтвердили полученные ранее на модельных образцах результаты о целесообразности использования эпиламирования для снижения материальных и энергетических потерь в узлах трения качения. Для повышения износостойкости эпиламированных подшипников необходимо обеспечить надежную защиту узлов от попадания в них абразивных частиц. Хотелось бы особо отметить, что эффективность эпиламирования подшипников качения, представляющих достаточно сложные трибосистемы, состоящие из определенного числа взаимо-

действующих между собой конструкционных элементов (внешнего и внутреннего колец, тел качения, сепараторов, смазочных устройств и т. д.), во многом зависит от того, какие элементы (части) узла подвергаются модифицирующей обработке.

Наш опыт исследования триботехнических характеристик покрытий эпилама свидетельствует о том, что назначение оптимального вида эпиламирования подшипников качения, имеющих самую разнообразную конструкцию (линейные направляющие, опоры с телами качения в форме шариков или роликов и т. д.), зависит от многих факторов, в том числе от эксплуатационных параметров и физико-химических особенностей работы сопряжений.



Рис. 6.10. Влияние частоты вращения на коэффициент сопротивления качению: 1 – исходные; 2, 3 – обработанные в 0,5 и 2,0 % эпиламирующем составе, соответственно. Условия испытаний: N = 2000 Н; смазочный материал – ЖРО.

6.3. Трение и изнашивание эпиламированных металлополимерных узлов трения

[926, 945]

Металлополимерные узлы трения – одно из заметных достижений материаловедческой науки XX-го века. Обладающие комплексом уникальных служебных свойств, материалы на основе полимерных композитов и металлов широко используются для улучшения триботехнических свойств самых различных узлов машин и механизмов. В этой связи актуальными представляются исследования, посвященные изучению трения и изнашивания эпиламированных металлополимерных сопряжений.

Исследовались триботехнические характеристики композицион-

ного полимерного материала на основе полиамида, аналогичного по своему составу материалу САМ-3, разработанному в ИММС НАН Б. В процессе испытаний полимерный вкладыш прирабатывался в режиме самосмазывания по исходным и эпиламированным валам, изготовленным из сталей марок 45 и 40Х, чугуна СЧ20 и стали с нанесенным на ее поверхность хромовым покрытием. Приработку производили при нагрузке 5 МПа, скорости относительного скольжения 0,2 м/с в течение 0,9 кс.

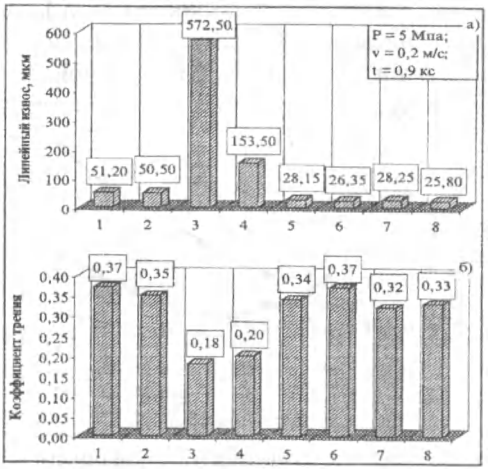


Рис. 6.11. Влияние материала вала и состояния его поверхности на приработочный износ (а) и коэффициент трения (б) сопряжений с вкладышем из материала САМ-3: 1, 2 – чугун СЧ20; 3, 4 – хромированная сталь; 5, 6 – сталь 45; 7, 8 – сталь 40Х; 1, 3, 5, 7 – вал исходный; 2, 4, 6, 8 – вал эпиламирован.

Коэффициент трения пар со стальными и чугунными как исходными, так и эпиламированными валами после завершения приработки находился в пределах от 0,32 до 0,37. Наименьший коэффициент трения отмечен для исходных (0,18) и эпиламированных (0,20) хромированных валов (рис. 6.11). Однако эти же валы больше всего изнашивали полимерный вкладыш. Так, приработочный износ вкладыша, работавшего в паре с хромированным валом, приблизительно в 20 раз больше износа полимерного композита, работавшего в паре с исходным стальным валом. Высокие значения износа сопряжений с хромированными валами, как показали дополнительные исследования, объясняются повышенной шероховатостью их рабо-

чих поверхностей после электрохимической обработки и, как следствие, преимущественно механическим изнашиванием полимерных вкладышей подшипниковых узлов.

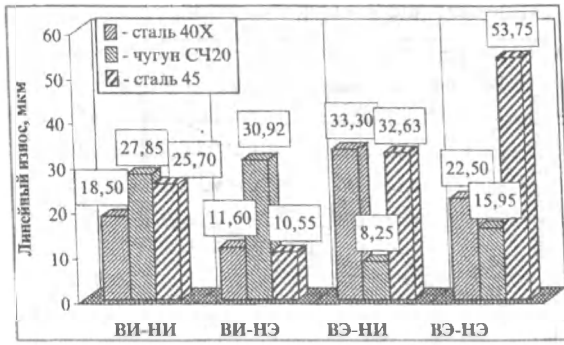


Рис. 6.12. Зависимость линейного износа пар трения с вкладышем из материала САМ-3 от вида обработки и материала вала: ВИ, НИ – верхний и нижний образцы не обработаны; ВЭ, НЭ – эпиламированные образцы.

Материал вала и вид обработки поверхностей деталей оказывают большое влияние на изнашивание полимера и в послеприработочный период (рис. 6.12). Как следует из представленных данных, оптимальным для пар со стальными валами является эпиламирование металлического элемента сопряжения (вала) при исходном полимере (вкладыше). Для пар с чугунными валами наименьший износ полимера имеет место при исходном вале и эпиламированном вкладыше. Кинетические износные испытания подтвердили высокую эффективность применения эпиламирования для повышения износостойкости металлополимерных пар трения (рис. 6.13).

Как и предполагалось ранее, оптимальный вид обработки эпиламом деталей узлов трения, выполненных из металлических и полимерных материалов, зависит от типа использованных при их изготовлении наполнителей и модификаторов. Например, наилучшие триботехнические свойства металлополимерных сопряжений со стальным валом (Ст 40Х), в которых вкладыш был изготовлен из ПА6 + 5 % мас. полиэтилена, реализуются в случае поверхностной обработки обеих деталей, входящих в исследуемую пару трения (рис. 6.14). Все образцы были предварительно приработаны в течение 0,9 кс при нагрузке 5 МПа и скорости скольжения 0,2 м/с в режиме самосмазывания. Испытания показали неоднозначное влияние материала вала и состояния его поверхности на изнашивание узлов трения.

Имеются основания предполагать, что основным фактором, определяющим оптимальные условия обработки деталей эпиламом и служебные характеристики металлополимерных трибосопряжений, является поверхностная энергия материалов.

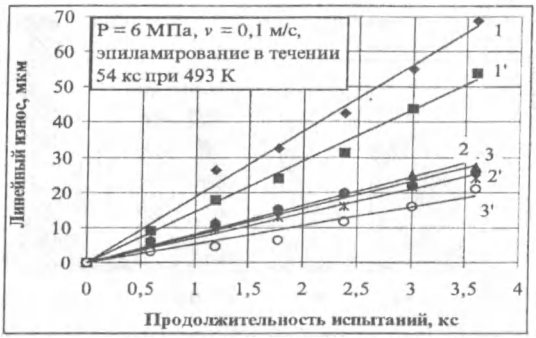


Рис. 6.13. Зависимость линейного износа пар трения с вкладышем из материала САМ-3 от продолжительности испытаний, вида обработки и материала вала: 1, 1' – чугун СЧ-20; 2, 2' – сталь 45; 3, 3' – сталь 40Х; 1–3 – исходный вал; 1'–3' – эпиламированный вал.

Можно также ожидать, что определенное влияние оказывает совместимость эпилама с тем или иным видом подшипниковых материалов и входящими в его состав наполнителями и модификаторами. В значительной степени эта совместимость проявляется в условиях трения материалов и может активно влиять на образование и свойства пленок фрикционного переноса. Так, например, для двух типов сопряжений стальной вал–композиционный полиамид можно рассчитывать на получение отличающихся друг от друга результатов в случае использования в качестве наполнителей в одном случае – полиэтилена (органическое соединение), а в другом – графита (неорганическое соединение). Аналогично, отличающиеся результаты могут быть получены при испытании трибосистем с одним и тем же вкладышем и различными материалами валов, например, стальным и чугунным. Это подтверждается результатами экспериментов, приведенными на рис. 6.11–6.14.

Износ резинового элемента резинометаллических уплотнений очень часто является причиной ухудшения служебных характеристик и даже отказов в процессе эксплуатации самых разнообразных технических систем. Повышение трибологической надежности такого типа узлов трения представляется достаточно актуальной задачей.

Исследование изнашивания резинометаллических сопряжений

вал–вкладыш осуществляли на машине трения СМТ-1, оснащенной трибоанализатором PCLW-01, при нагрузке 440 Н и скорости относительного скольжения 0,63 м/с в течение 0,9 кс. Смазывание испытываемой пары осуществлялось погружением нижней части вала в ванну с дизельным маслом М 14Б. Валы диаметром 40 мм и шириной 12 мм изготавливали из стали марок 45, 40Х, А12, а также чугуна СЧ20. Резиновые вкладыши с рабочей поверхностью 2 см² изготавливали из бензомаслостойкой резины № 3826 методом горячего прессования на прессе ВП-09126 при температуре 423 К в течение 0,3 кс. Обработку деталей производили эпиламом 6 СФК-180-05 в течение 72 кс при комнатной температуре.

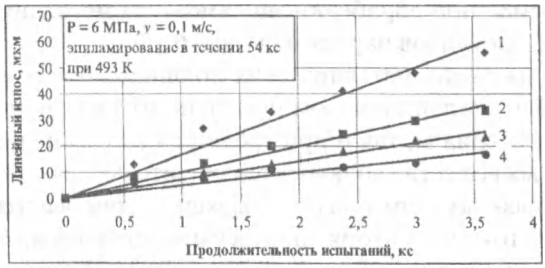


Рис. 6.14. Зависимость линейного износа пар трения со стальным валом (сталь 40Х) и вкладышем из ПА6+5 мас. % полиэтилена от продолжительности испытаний и вида обработки деталей: 1 – вал и вкладыш исходные; 2 – вкладыш эпиламирован; 3 – вал эпиламирован; 4 – вал и вкладыш эпиламированы.

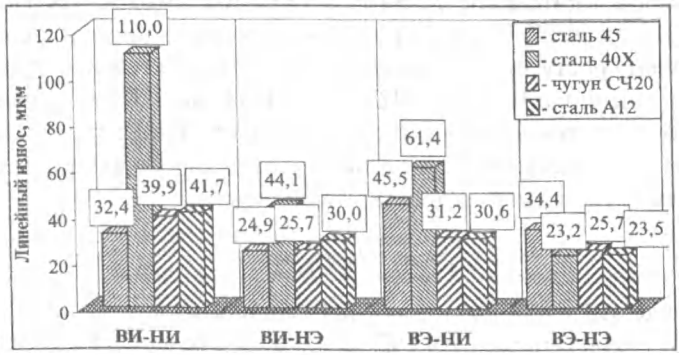


Рис. 6.15. Зависимость линейного износа пар трения сталь–резина (№ 3826) от материала вала и вида обработки деталей: МИ, РИ – вал и резиновый вкладыш исходные; МЭ, РЭ – вал и резиновый вкладыш эпиламированы.

Анализ полученных данных (рис. 6.15) свидетельствует, что износ резинометаллических трибосопряжений существенно зависит от вида металла, использованного для изготовления контртела, а также от способа технологической обработки деталей узлов трения эпиламом. Так, в случае вала, изготовленного из стали 45, минимальный износ имел место в случае эпиламирования только металлического элемента трибосистем. Этот вид обработки оказался оптимальным и для сопряжений с валом, изготовленным из стали ШХ-15, и смазывания пар погружением нижней части вала в ванну с дизельным топливом Л62. Для сопряжений с валом из чугуна СЧ20 наибольшая износостойкость отмечена в случае эпиламирования только вала и совместной обработки эпиламом как металлического, так и резинового элементов пар трения (рис. 6.15).

Испытания резинометаллических подшипниковых узлов с эпиламированным стальным валом показали, что как при трении без смазочного материала, так и при трении с использованием различных смазочных веществ наблюдаются значительные колебания (цикличность) линейных размеров испытываемых трибосистем, обусловленные их постоянно повторяющимися и чередующимися процессами изнашивания и дилатации. Термоизносные характеристики таких сопряжений характеризуются амплитудой и продолжительностью циклов колебательного процесса, зависящими от шероховатости поверхности стального вала (рис. 6.16, 6.17). При этом, с увеличением параметра R_a стального вала отмечается рост значений амплитуд и продолжительностей циклов термоизносных характеристик. Так, увеличение R_a с 0,185 до 0,608 мкм привело также и к соответствующему росту значений амплитуд и продолжительности циклов, соответственно, с 17,0 до 30,42 мкм и с 0,387 до 0,575 кс. Аналогичным образом изменились и некоторые другие, производные от амплитуд и продолжительности циклов колебательного процесса, характеристики. Например, скорость изнашивания

$$(I_c = \bar{A}_{\text{ти}} / t_{\text{ти}}, \text{ мкм/кс})$$

и циклический износ (W_c – средняя величина износа за цикл) увеличились, соответственно, с 43,93 до 52,90 мкм/кс и с 2,11 до 4,08 мкм/цикл.

Использование гармонического анализа (см. главу 5 настоящей работы) позволило представить экспериментальные данные в виде тригонометрических многочленов (выражения 6.2–6.5).

Расчеты показывают, что амплитудные характеристики, построенные по экспериментальным данным (рис. 6.16, графики 1), достаточно хорошо соответствуют характеристикам (рис. 6.16, графики 2), построенным с использованием уравнений (6.2–6.3). Коэффициенты корреляции равняются 0,915 и 0,876 для сопряжений с шероховатостью стального вала R_a = 0,185 и 0,608 мкм, соответственно.

$$A_{\text{ТИ, }0{,}185}(t) = 11{,}4167 + 3{,}1179\sin(t - 0{,}1064) + 6{,}1458\sin(2t - 2{,}3200) + \\ + 4{,}0035\sin(3t + 1{,}5291) + 5{,}0504\sin(4t - 1{,}3401), \qquad (6.2)$$

$$A_{\text{ТИ, }0{,}608}(t) = 8{,}4583 + 4{,}7013\sin(t - 2{,}8669) + 1{,}6729\sin(2t + 1{,}4844) + \\ + 4{,}7908\sin(3t - 1{,}7989) + 10{,}1554\sin(4t - 0{,}6734) \qquad (6.3)$$

при $\omega = 1\ \text{с}^{-1}$.

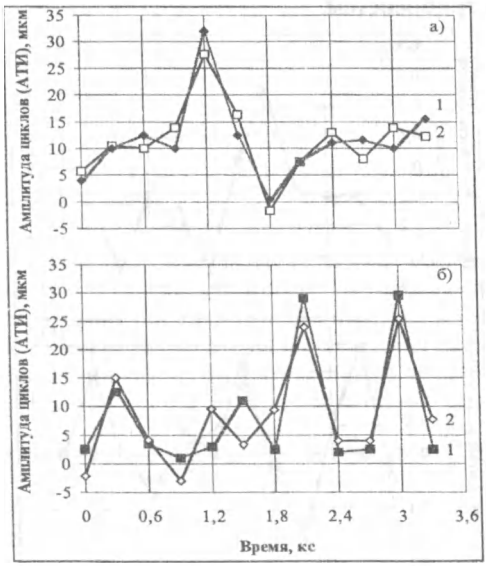


Рис. 6.16. Амплитудные характеристики резинометаллических сопряжений с эпиламированным стальным валом:
1 – эксперимент; 2 – расчет по уравнениям (6.2, 6.3); шероховатость стального вала 0,185 мкм (а) и 0,608 мкм (б);
резинового вкладыша – 0,9–1,0 мкм; материал вала – сталь 40Х.

Аналогично были получены гармонические ряды 6.4, 6.5, описывающие связь между продолжительностью циклов термоизносных

характеристик, временем испытаний и шероховатостью металлического элемента пар трения. Как и в случае амплитудных характеристик, наблюдается хорошее соответствие между экспериментальными и расчетными данными:

$$t_{\text{ТИ, }0{,}185}(t) = 0{,}2825 + 0{,}1147\sin(t - 0{,}2197) + 0{,}0926\sin(2t - 2{,}5712) + \\ + 0{,}0814\sin(3t + 1{,}7561) + 0{,}1424\sin(4t - 1{,}3873), \quad (6.4)$$

$$t_{\text{ТИ, }0{,}608}(t) = 0{,}3525 + 0{,}0322\sin(t + 1{,}8807) + 0{,}0853\sin(2t + 1{,}8274) + \\ + 0{,}189\sin(3t - 0{,}6541) + 0{,}1566\sin(4t - 1{,}1431) \quad (6.5)$$

при $\omega = 1\ с^{-1}$.

Внешняя форма временных характеристик, представленных на рис. 6.17, свидетельствует, что продолжительность циклов, также как и амплитуда, является переменной величиной в течение всего периода испытаний трибосистем.

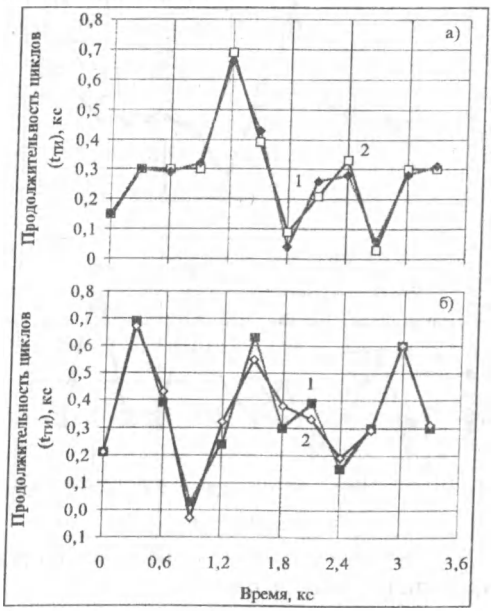


Рис. 6.17. Временные характеристики резинометаллических сопряжений: 1 – эксперимент; 2 – расчет по уравнениям (6.4, 6.5); шероховатость стального вала 0,185 мкм (а) и 0,608 мкм (б).

Средние экспериментальные значения продолжительности цик-

лов термоизносных характеристик резинометаллических сопряжений с эпиламированными стальными валами, имеющими шероховатость рабочей поверхности R_a = 0,185 и 0,608 мкм, равнялись 0,387 и 0,575 кс, соответственно.

Применение разработанного нами метода корреляционных квадратов позволило не только убедиться в достаточно хорошей временной взаимосвязи термоизносной и фрикционной характеристик, но и в совершенстве использованных методик трибодилатометрических измерений (рис. 6.18).

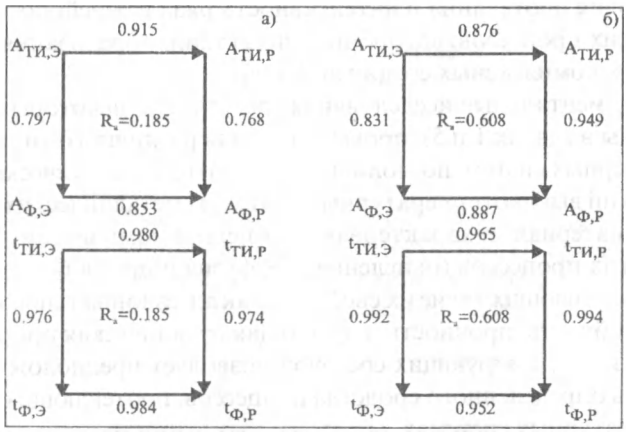


Рис. 6.18. Коэффициенты корреляции экспериментальных (э) и рассчитанных (р) по уравнениям (6.2-6.5) значений амплитуд (А) и длительностей (t) циклов термоизносной (ти) и фрикционной (ф) характеристик резинометаллических сопряжений с эпиламированным стальным валом: R_a=0,185 (а) и 0,608 (б) мкм, соответственно.

6.4. Физико-химические процессы в эпиламированных узлах трения

[926, 929, 932, 935, 943, 945, 950]

Исследования, проведенные нами в последние годы, достаточно убедительно показали высокую эффективность использования покрытий эпилама для повышения трибологической надежности самых разнообразных сопряжений машин и механизмов. Полученные результаты наглядно свидетельствуют о том, что эпиламирование позволяет уменьшить материальные (износ) и энергетические (коэффициент трения) потери в трибосопряжениях, имеющих различное конструкционное исполнение, работающих как в условиях сухого тре-

ния, так и смазывания, предусматривающих подачу смазочных материалов в зону трения самыми разнообразными способами и др.

Имеются основания считать, что величина износа сопряжений в значительной степени зависит от особенностей физико-химического взаимодействия в зоне фрикционного контакта металла с покрытием эпилама. Общеизвестно, что при трении такой контакт характеризуется достаточно высокими температурами, достигающими, а иногда даже превосходящими температуру плавления одного из элементов трибосистемы. Температура в трущемся сопряжении определяет условия протекания и интенсивность ряда важнейших физико-химических процессов: адсорбции, дилатации, образования новых, например, комплексных соединений и др.

Фундаментальные исследования (результаты некоторых из них приведены в главах 1 и 5), проведенные для различного типа металлополимерных систем, позволили установить, что статический и динамический высокотемпературные контакты металлических и полимерных материалов характеризуются целым комплексом физико-химических процессов (окисление, диффузия и др.), в большой степени определяющих такие их свойства, как адгезионная способность, износостойкость, прочность и др. Общая органическая природа полимеров и эпиламирующих составов позволяет предположить возможность определенного сродства процессов, протекающих в высокотемпературных системах, образованных этими материалами с металлами.

Одним из эффективных современных методов исследования физико-химических процессов, протекающих в материалах в результате воздействия повышенных температур, является дифференциальный термический анализ (ДТА).

ДТА проводился на дериватографе Q-1500D. В исследованиях использовались исходные и эпиламированные порошки металлов с дисперсностью от 50 до 75 мкм. Процесс эпиламирования заключался в обработке навески (2 г) порошкообразного металла 20 мл эпилама 6 СФК-180-05 с последующей сушкой покрытий при 293 и 373 К. ДТА проб, масса которых находилась в пределах от 1,0 до 1,1 г, проводился до 773 К со скоростью нагрева 5 град/мин. Для каждой исследуемой пробы материала измерялись температура (*T*), изменение массы (*TG*), скорость изменения массы (*DTG*) и изменение содержания тепла (*DTA*).

На рисунках 6.19–6.21 представлены кривые *DTA*, *DTG* и *TG* исходных и эпиламированных порошков алюминия, железа и меди.

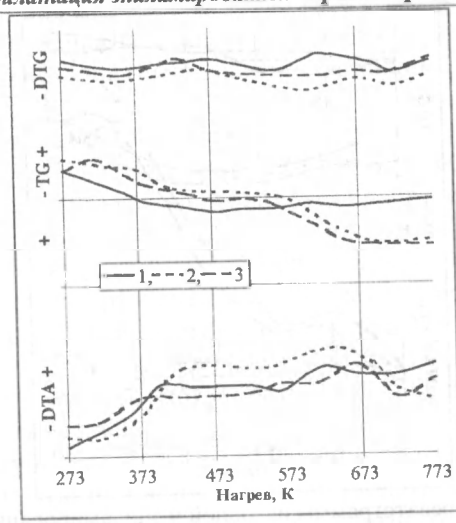


Рис. 6.19. Дериватограммы исходного алюминия (1) и эпиламированного металла с термообработкой при 293 (2) и 373 (3) К: DTG – скорость изменения массы; TG – изменение массы; DTA – изменение содержания тепла.

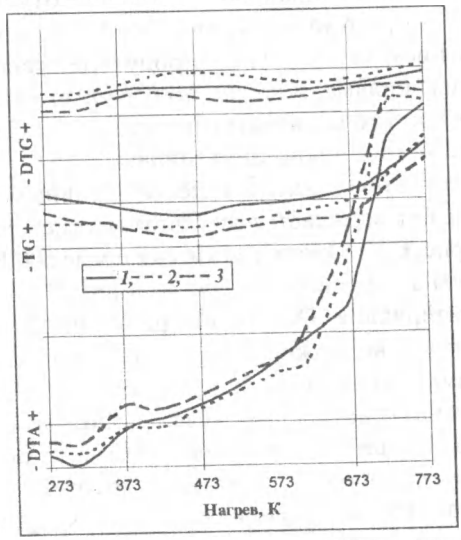


Рис. 6.20. Дериватограммы исходного и эпиламированного железа. Обозначения (1–3) аналогично рис. 6.19.

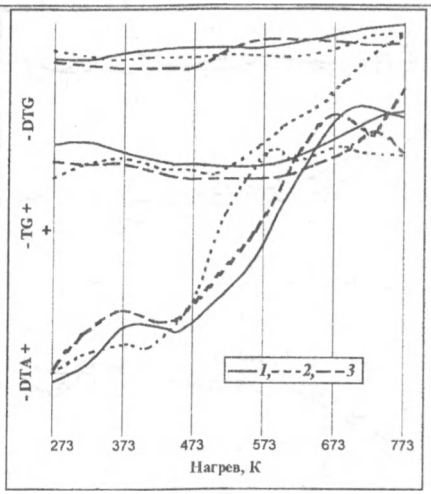


Рис. 6.21. Дереватограммы исходной и эпиламированной меди. Обозначения (*1–3*) аналогично рис. 6.19.

Как следует из представленных данных, в исследованном диапазоне температур исходный и эпиламированный алюминий (рис. 6.19) ведут себя практически одинаково. Небольшие отличия, наблюдаемые на кривой *TG* при температурах более 580 К, могут быть обусловлены выделением газообразных продуктов реакции термодеструкции покрытия эпилама. В целом, полученные данные позволяют констатировать достаточно низкую интенсивность физико-химических процессов в системе алюминий–эпилам.

Железо является более каталитически активным металлом, чем алюминий, что и подтверждается результатами экспериментов, представленных на рис. 6.20. Практически уже после 500 К наблюдается увеличение массы анализируемых как исходных, так и эпиламированных проб материалов. Основной причиной этого может быть окисление металла, а, возможно, и находящегося на его поверхности покрытия эпилама. Как свидетельствуют кривые *DTA*, характер физико-химического взаимодействия железа с эпиламом заметно изменяется после 620 К. При этом наличие эпилама на поверхности металла катализирует процесс его окисления, который, по сравнению с исходным железом, начинается при более низких (примерно от 40 до 50 градусов) температурах.

Характер физико-химического взаимодействия меди с покрытием эпилама (рис. 6.21) заметно отличается от рассмотренных ранее

систем покрытие эпилама–алюминий, железо. Анализ кривых *TG* показывает, что исходная медь окисляется, начиная с 523 К, медь с покрытием – примерно с 623 К. Максимум пика химической реакции окисления для исходной меди имеет место при 548 К, эпиламированной и термообработанной при 293 и 373 К – 668 и 703 К, соответственно (покрытие эпилама ингибирует процесс окисления меди, сдвигая его в область более высоких температур). При этом покрытие, термообработанное при 373 К, обладает более высокой защитной способностью по сравнению с покрытием, термообработанным при 293 К. Следовательно, термообработка при 373 К улучшает служебные свойства покрытий эпилама на медных подложках, эффективно защищая их от высокотемпературного окисления. Отмеченное улучшение свойств может быть достигнуто за счет более совершенной структуры покрытия и увеличения его адгезии к металлической поверхности. В принципе, можно ожидать, что температура термообработки, в зависимости от ее абсолютного значения, времени действия, типа металлической подложки и некоторых других факторов, может оказывать достаточно сложное влияние на свойства системы металл–покрытие эпилама.

Представляет несомненный интерес характер изменения кривых *DTA* (рис. 6.21) при температурах до 473 К. Поскольку при них практически не происходит сколько-нибудь заметного изменения массы анализируемых проб (кривые *DTG*), то наличие соответствующих максимумов на кривых *DTA* объясняется процессами изменения фазового состояния материалов. Фазовые превращения могут быть обусловлены неустойчивым состоянием металлов, возникшим, например, в результате их предшествующей обработки (холодной пластической деформации, быстрого охлаждения, неравномерного приложения напряжений и др.). Термическая обработка покрытий приводит к тому, что процессы, приводящие металл в равновесное состояние (снятие напряжений, уменьшение искажений кристаллической решетки, рекристаллизация, диффузия и др.), достигают заметных скоростей. Можно заметить также, что по сравнению с исходной медью эпиламирование и последующая термообработка покрытий на медных подложках приводят не только к смещению пиков, характеризующих фазовые превращения материалов в область более высоких температур, но и к практически полному исчезновению (473 К) некоторых из них.

Таким образом, на основании результатов проведенных исследований можно сделать следующие выводы. В системе металличес-

кая поверхность–покрытие эпилама возможно протекание процессов как катализа, так и ингибирования окисления металла. При этом интенсивность физико-химического взаимодействия зависит не только от температуры термообработки, но и от природы металла, контактирующего с пленкой эпилама. Можно предположить, что специфические особенности физико-химического взаимодействия металлов с покрытием эпилама обусловливаются содержанием в их поверхностных слоях, а, возможно, и в объеме продуктов контактных реакций, например, веществ типа солей жирных кислот. Возможность образования подобного рода соединений непосредственно подтверждается структурой эпиламов, содержащих в своем составе активные группы (карбоксильные, карбонильные, гидроксильные и др.).

Проведенные исследования показали, что пленка эпилама, будучи нанесенной на поверхность твердого тела, существенно изменяет его свойства. В условиях трения со смазочным материалом, в частности, это приводит к повышению адгезионных свойств поверхностей, т. е. эпиламированные материалы, по сравнению с исходными, в аналогичных условиях испытаний удерживают на своей поверхности большее количество смазочного вещества. Это безусловно должно привести и к улучшению триботехнических свойств сопряжений, особенно в начальном (пусковом) периоде их работы.

Изменение энергетического состояния поверхностей материалов после их эпиламирования должно также некоторым образом сказываться и на свойствах смазочного материала, непосредственно контактирующего с покрытием эпилама. В этом случае можно ожидать, что эксперименты по изучению кинетики растекания смазочных масел на исходных и эпиламированных поверхностях позволят получить новую информацию об их физико-химических свойствах и на этой основе наметить конкретные пути улучшения эксплуатационных свойств трибосопряжений.

Исследование кинетики растекания смазочных масел производили на стеклянных образцах (предметные стекла), поверхность которых подвергалась тщательной очистке. Очистка предусматривала промывку последовательно в ацетоне, этиловом спирте и дистиллированной воде с последующей сушкой образцов при комнатной температуре. В качестве смазочного материала в экспериментах использовалось масло МС-20. Эпиламирование стеклянных образцов осуществлялось смазочной композицией 6 СФК-180-05 при комнатной температуре в течение 0,6 кс с последующей термообработкой покрытий при 293 и 423 К. Кинетику растекания смазочного материа-

ла оценивали по изменению диаметра капли масла, для измерения которого использовали специальное устройство на базе горизонтального измерительного микроскопа. Погрешность измерения диаметра капли масла составляла 5 мкм при начальном (исходном) диаметре капли масла, равном примерно 6 мм. Для расчета средних значений диаметров масляных капель использовали результаты 9 параллельных измерений.

Как следует из представленных на рис. 6.22 данных, кинетика растекания масла на исходных и эпиламированных поверхностях существенно отличаются друг от друга. Для исходных стеклянных подложек среднее изменение (увеличение) диаметра масляной капли не превысило 0,13 мм (рис. 6.22, кривая 1). Для эпиламированных стеклянных поверхностей, сушка которых осуществлялась при 293 К, аналогично изменение составило около 0,76 мм, т. е. было примерно в 6 раз больше (рис. 6.22, кривая 2). Повышение температуры сушки покрытий с 293 до 423 К уменьшило растекаемость масляных капель (рис. 6.22, кривая 3), которая все же осталась в несколько раз больше, чем на исходных стеклянных поверхностях.



Рис. 6.22. Кинематика растекания капли масла МС-20 на стеклянной поверхности: 1 – исходная поверхность; 2 – эпиламированная поверхность с сушкой покрытия на воздухе; 3 – эпиламированная поверхность с сушкой покрытия при 423 К.

Следует отметить также и разное время, в течение которого происходила стабилизация размеров масляных капель. Так, если для исходных подложек оно составляло около 1,0 кс, то для эпиламированных – от 3,5 до 5,5 кс.

Учитывая, как уже отмечалось выше, что эпиламирование обусловливает увеличение адгезии подложек, в частности, к органичес-

ким жидкостям, обнаруженные закономерности растекания смазочных масел могут быть объяснены следующим. Пленка эпилама, нанесенная на поверхность твердого тела, с одной стороны, взаимодействует с его тонкими поверхностными слоями, а с другой – оказывает энергетическое воздействие на непосредственно контактирующий с ней слой смазочного вещества. Воздействие покрытия эпилама на смазочный материал распространяется на некоторое расстояние от границы фактического контакта этих веществ. Таким образом, капля смазочного материала, помещенная на эпиламированную поверхность, будет растекаться по ней на некотором удалении от границы их фактического контакта. Вышеизложенное позволяет сделать вывод о том, что покрытие эпилама обладает способностью влиять на триботехнические характеристики узлов трения путем изменения физических и химических свойств не только поверхностных слоев материалов, но и контактирующего с ними смазочного вещества (среды).

Анализ физико-химических процессов, характерных для статического и динамического контактов покрытий эпилама с металлами, показывает, что в общем случае основными, относительно элементарными актами, влияющими на состояние пленки, являются тепловая десорбция молекул эпилама или их фрагментов, перенос молекул ПАВ на сопряженную поверхность, химические изменения в адсорбционном слое, приводящие к уменьшению энергии адсорбции и ухудшению, в конечном счете, эксплуатационных характеристик покрытий. В связи с вышеизложенным, изменение средней эффективной толщины пленки ПАВ в процессе трения может быть определено в результате решения следующего дифференциального уравнения:

$$\frac{d\delta}{dt} = -\frac{\delta}{\tau_a} - \Phi(\delta, C_x) - af(\delta)S_\phi + a'f'(\delta')S_\phi, \qquad (6.6)$$

где δ, δ' – толщина покрытия на сопряженных поверхностях; a, a' – соответствующие кинетические коэффициенты переноса; τ_a – эффективное время жизни молекул в адсорбированном состоянии; C_x – концентрация активных веществ, способных вызвать химические процессы в пленках; S_ϕ – относительная площадь фактического контакта на сопряженных поверхностях; $f(\delta)$, $f'(\delta')$ – функции, учитывающие перенос пленки на сопряженные поверхности; t – время; $\Phi(\delta, C_x)$ – скорость изменения толщины покрытия в результате протекания окислительных, деструкционных и других химических процес-

сов.

Для ряда пар трения возможен квазиравновесный процесс, при котором прямой перенос вещества от эпиламированной поверхности на сопряженную компенсируется обратным процессом. В этом случае

$$af(\delta)S_{\Phi} = a'f'(\delta')S'_{\Phi}. \qquad (6.7)$$

Если химические изменения протекают под действием низкомолекулярных компонентов внешней среды, например, паров воды, кислорода и реакция имеет первый порядок, то

$$\Phi(\delta, C_x) = C_x \sum_i k_i \delta_i,$$

где δ_i – толщина покрытия на *i*-том участке; k_i – константа скорости на *i*-том участке поверхности.

В случае, когда характерное время химических изменений больше времени тепловой релаксации в поверхностных слоях, можно ввести эффективную константу скорости реакции k_i, зависящую от средней температуры в зоне трения.

Тогда

$$\Phi(\delta, C_x) = kC_x\delta. \qquad (6.8)$$

С учетом выражений (6.7) и (6.8) решением уравнения (6.6) при начальном условии $\delta(t = 0) = \delta_0$ является выражение

$$\delta = \delta_0 \exp\left[-t\left(\frac{1}{\tau_a} + kC_x\right)\right], \qquad (6.9)$$

где δ_0 – толщина покрытия в начальный момент времени.

Выражение (6.9) получено при условии изотермичности процесса трения. В общем случае $t_a = t_a[T(t)]$, поэтому решение уравнения (6.6) возможно только численными методами.

Образование частиц износа в условиях наличия граничной пленки может происходить, прежде всего, в результате ее разрушения и образования прочных адгезионных связей между контактирующими поверхностями. В случае преимущественно адгезионного взаимодействия поверхностей трения скорость объемного изнашивания определяется выражением

$$I = bV_0WN_a, \tag{6.10}$$

где b – вероятность когезионного разрушения связи; V_0 – средний объем частицы износа; W – частота разрушения адгезионных связей; N_a – плотность адгезионных связей.

В соответствии с данными работы [144]

$$W = \gamma_1(1-\gamma_2 n)v_c, \tag{6.11}$$

где γ_1, γ_2 – геометрические параметры динамической и статической зон взаимодействия; n – плотность активных микроучастков поверхности металла; v_c – скорость скольжения.

Как следует из соотношений (6.10) и (6.11), основным параметром, влияющим на износ пленок эпилама, является плотность адгезионных связей N_a, образующихся в процессе трения между взаимодействующими поверхностями. Вероятность их генерации определяется толщиной покрытия.

Поэтому, оценивая кинетику изнашивания поверхностей, содержащих пленку эпилама, в общем случае можно выделить две основные стадии процесса. При $\delta \geq \delta^0$ (δ^0 – эффективная толщина слоя эпилама, при которой обеспечивается полное заполнение поверхности) износ имеет минимальное значение и наблюдается только при относительно высоких контактных давлениях. При малых толщинах слоя ($\delta < \delta^0$) вероятность образования адгезионных связей на границе основы с контртелом более высокая и в линейном приближении можно записать

$$N_a \sim \delta^0 - \delta. \tag{6.12}$$

Следовательно, при таких толщинах на основании соотношения (6.10) и с учетом (6.9), (6.11) и (6.12) кинетика изнашивания может быть описана выражением

$$I \sim bV_0\gamma_1(1-\gamma_2 n)v_c\delta^0\left\{1-\exp\left[-t\left(\frac{1}{\tau_a}+kC_x\right)\right]\right\}.$$

При относительно низких температурах поверхности и величинах контактных давлений выполняется условие

$$\frac{1}{\tau_a}+kC_x \ll \frac{1}{t}.$$

Тогда скорость изнашивания определяется выражением

$$I \sim bV_0\gamma_1(1-\gamma_2 n)v_c\delta^0\left(\frac{1}{\tau_a}+kC_x\right)t. \qquad (6.13)$$

Анализ выражения (6.13) показывает, что скорость изнашивания практически линейно возрастает при увеличении пути трения ($l_T = v_c t$) и зависит от температуры, так как τ_a является функцией T. Разогрев узла трения снижает время τ_a и, соответственно, интенсифицирует процессы изнашивания.

Данный вывод полностью согласуется с представленными на рис. 6.23 результатами экспериментов.



Рис. 6.23. Зависимость коэффициента трения (1–3) и линейного износа (1`-3`) сопряжений сталь–бронза (P=2,0 МПа) от скорости скольжения: 1, 1` – исходные сопряжения с эпиламированными нерабочими (непосредственно не участвующими в трении) поверхностями; 2, 2` и 3, 3` – сопряжения, рабочие поверхности которых обработаны, соответственно, составами 6 СФК 180-05 и 6 СФК 180-20; давление – 2 МПа.

Опытные зависимости интегрального износа от скорости скольжения могут быть достаточно точно описаны выражением (6.13). Кроме этого, из представленных зависимостей следует, что существенное влияние на эффективность обработки оказывает не только массоперенос между сопряженными поверхностями (трибоперенос), но и поверхностный массоперенос. Так, вследствие высокой поверхностной подвижности молекул эпилама наблюдается эффект снижения трения даже в случае, когда эпиламированию подвергаются участки поверхности непосредственно не контактирующие с контртелом (рис. 6.23, кривая 1).

Основываясь на экспериментально подтвержденном влиянии

массопереноса молекул эпилама на триботехнические свойства поверхностей твердых тел, представляется возможным осуществить теоретическую оценку оптимальных температурных режимов эксплуатации эпиламированных узлов трения.

При контакте шероховатых поверхностей, высота микровыступов которых больше или соизмерима с толщиной покрытия, практически всегда происходит его разрушение, образование участков, свободных от адсорбированных молекул покрытия. В связи с этим важным является обеспечение условий, когда за время между последовательными актами образования фактического контакта контртела с данным участком поверхности происходит его адсорбционное заполнение за счет диффузии молекул ПАВ с границы зоны контакта. Отметим, что повышение средней температуры поверхности активирует процессы массопереноса, способствуя образованию динамичного самовосстанавливающегося покрытия.

Таким образом, одно из условий оптимального функционирования покрытий имеет вид

$$\left(t_{\partial} = \frac{l^2}{4D}\right) \le \left(t_{\mathrm{T}} = \frac{1}{v_{\mathrm{c}}\sqrt{N}}\right), \tag{6.14}$$

где t_{∂} – характерное время диффузионного массопереноса; l – размер участка поверхности, свободного от покрытия; D – коэффициент диффузии; t_{T} – среднее время между последовательными актами образования пятен контакта на данном участке поверхности; N – средняя плотность пятен контакта.

Условие (6.14) можно преобразовать в соотношение

$$T \ge \frac{Q}{R}\left(\ln\frac{v_{\mathrm{c}} l^2 \sqrt{N}}{4D_0}\right), \tag{6.15}$$

где Q – энергия активации поверхностной диффузии; R – универсальная газовая постоянная; D_0 – предэкспоненциальный множитель.

Второй температурный критерий оценки условий эффективности смазочного покрытия может быть записан в виде

$$T \le T_{\mathrm{T}}, \tag{6.16}$$

где $T_т$ – температура термостойкости покрытия; T – температура поверхности трения.

Анализ выражений (6.15) и (6.16) показывает, что оптимальные параметры эксплуатации пленок эпилама находятся в достаточно ограниченной области значений температур (рис. 6.24).

При увеличении скорости скольжения интервал оптимальных значений температур уменьшается, а при $v_c > v_{c,o}$ покрытие эффективно только на начальных стадиях контактного взаимодействия. Значение $v_{c,o}$ уменьшается при увеличении плотности пятен контакта, которая при одинаковом режиме обработки поверхности связана с высотой микрошероховатостей.



Рис. 6.24. Теоретические зависимости предельных температур эксплуатации покрытий эпилама от скорости скольжения железных образцов; микрогеометрические характеристики рабочих поверхностей соответствуют точению по 8-му классу; значения удельных давлений: 0,3 (1); 0,7(2); 1,3(3); 1,5(4); и 2,0(5) МПа.

Из представленных на рис. 6.25 данных следует, что с увеличением скорости скольжения коэффициент трения возрастает, что полностью согласуется с выводами предлагаемой модели.

Наблюдаемое одновременно повышение температуры, по-видимому, в недостаточной степени при высоких скоростях скольжения активирует процессы поверхностного массопереноса. Уменьшение высоты неровностей a, соответственно, увеличение плотности пятен контакта сдвигает значение оптимальной скорости скольжения, при которой трение минимальное, в область меньших значений, что также соответствует результатам анализа выражения (6.15).

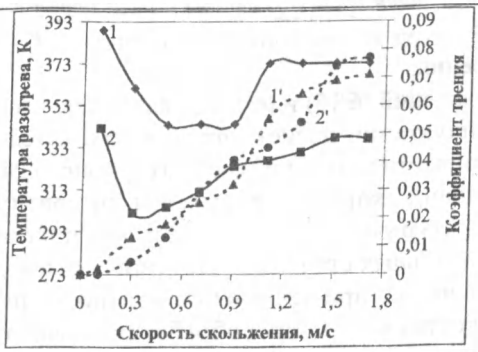


Рис. 6.25. Зависимость коэффициента трения (1, 2) и температуры разогрева (1`, 2`) сопряжения сталь–бронза от скорости скольжения: 1, 1` – $R_a$=1,34 мкм; 2, 2`– R_a=0,62 мкм; фитильная смазка подшипниковаго узла.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что в зоне контакта металлических поверхностей с покрытием эпилама протекает комплекс взаимосвязанных физико-химических явлений, интенсивность которых определяется, в основном, температурным режимом работы трущихся сопряжений. Кроме того, сама температура, а точнее ее абсолютные значения, определяет работоспособность (долговечность) самых разнообразных трибосистем. С учетом того, что температурный фактор в подавляющем большинстве случаев является главной причиной дилатации узлов трения, можно отметить значительную актуальность трибодилатометрических исследований как в настоящем, так и в будущем времени.

ГЛАВА 7. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТРИБОДИЛАТОМЕТРИИ

Прогресс в развитии практически всех отраслей знаний, в том числе и трибодилатометрии, во многом зависит от своевременной оценки уровня их развития, имеющихся достижений, нерешенных задач и проблем и, что наиболее важно, путей их решения и основных направлений будущего развития.

7.1. Трибодилатометрия – состояние, достижения, проблемы

[919, 922, 942, 948, 952, 954–956, 964–972, 974]

Анализ современного состояния трибодилатометрии позволяет утверждать, что сегодня она является динамично развивающимся разделом трибодиагностики, имеющим свой круг задач и эффективных методов их решения в самых разнообразных направлениях трибологии.

Являясь частью общей системы трибологических испытаний материалов, трибодилатометрия при решении конкретных задач использует многие, уже ставшие классическими, методы и подходы трибологии, а также, с учетом собственной специфики, разрабатывает свои оригинальные методические приемы и способы.

Проведенные исследования, в целом подтвердившие определяющую роль теплового фактора в изнашивании и дилатации узлов трения, послужили основанием для разработки ряда трибоконструкций, содержащих в своем составе устройства для измерения износа. Отличительной особенностью этих конструкционных решений и способов является то, что износ оценивается на основе измерений температуры (разности температур) в конкретных местах элементов узла трения.

Подшипник скольжения (рис. 7.1) состоит из вала 1 и вкладыша 2, рабочая поверхность которого выполнена в виде чередующихся рабочих участков и вставок (пазов) 3, 4. Материал вставок имеет теплопроводность, отличную от теплопроводности материала части поверхности трения, находящейся между вставками. На одинаковом расстоянии от поверхности трения, определяемом предельной величиной износа вкладыша (δ), в средней части вставки и рабочих

участков (например, находящихся между вставками) подшипника размещаются термопары 5, 6. Термопары–источники ЭДС – подключены к регистрирующим приборам, образующим измерительный блок 7.

Трение вала по рабочей поверхности вкладыша приводит к генерированию в зоне контакта тепла. Температура, измеряемая термопарами, будет различной, так как теплопроводность рабочих участков материала вкладыша отличается от теплопроводности вставок (пазов). Разность фиксируемых температур будет уменьшаться по мере износа вкладыша и при соответствующей тарировке приборов измерительного блока будет определять численную величину износа в процессе эксплуатации подшипникового узла.

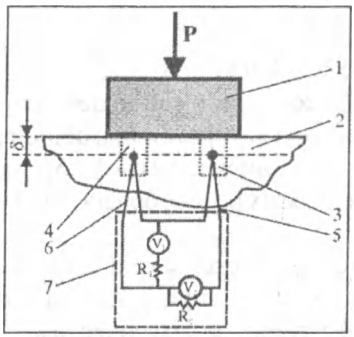


Рис. 7.1. Схема подшипника скольжения с устройством для измерения износа: 1 – подвижная деталь сопряжения (вал); 2 – неподвижная деталь (втулка); 3, 4 – вставки; 5, 6 – термопары; 7 – измерительный блок.

Комбинированное соединение термопар 5, 6 (рис. 7.1) позволяет регистрировать как абсолютную температуру в подшипнике, так и фиксируемую разность температур. Возможна также дифференциальная схема соединения термопар, при которой регистрируется только разность температур в точках, расположенных в средней части пазов и рабочих участков. Выбор той или иной схемы соединения термопар определяется конкретными требованиями к подшипнику скольжения. Комбинированное соединение предпочтительнее использовать в случае наличия возможности перегрева узла, например, вследствие значительного ужесточения нагрузочно-скоростного режима работы. Одновременно (как и при дифференциальной схеме соединения) имеется возможность оценки степени износа сопряжений в процессе эксплуатации.

Работоспособность конструкции подшипника скольжения во

многом зависит от теплофизических характеристик материалов рабочих участков (поверхности трения) и вставок (пазов). Перспективен подшипник скольжения, у которого пазы заполнены материалом с теплопроводностью, существенно отличающейся от теплопроводности материала рабочих участков. Подобное сочетание материалов, например, реализуется в металлополимерных узлах трения, получивших широкое распространение в конструкциях многих машин и механизмов. Это позволяет увеличить разность между значениями температур, фиксируемых термопарами 5, 6 и, следовательно, повысить точность измерений.

Кроме того, точность измерений предельной величины износа подшипниковых узлов может быть также повышена путем использования в качестве оптимизационного критерия коэффициентов температуропроводности материалов вставок и пазов.

С целью повышения экономичности технического обслуживания, ремонта и эксплуатационной технологичности подшипника, он может быть выполнен состоящим из обоймы и вкладыша с толщиной, равной глубине основного паза. Выполнение подшипника составным (из обоймы и вкладыша) позволяет вынести чувствительные датчики за пределы вкладыша и установить их стационарно в обойме подшипника. Это обеспечивает защиту элементов измерительной цепи от механических повреждений при ремонте и обслуживании узлов трения, например, с целью замены вкладышей по причине их предельного износа.

Экспериментальные исследования модельных узлов трения скольжения (рис. 7.2) подтвердили возможность оценки износа на основе температурного режима работы узлов трения.

Представленная конструкция узла трения и ее возможные варианты отличаются рядом оригинальных технических решений. Вместе с тем, хотелось бы отметить одно из главных достоинств, с нашей точки зрения, этих устройств – минимальное энергопотребление, так как реализация функций измерительной цепи осуществляется за счет тепла генерируемого непосредственно самим контролируемым трибосопряжением.

Примерно через год после защиты нами в патентном ведомстве своего приоритета в разработке подшипниковых узлов, позволяющих оценивать их износ на основе измерений температурного режима работы, одно из наших решений было полностью повторено в разработке концерна Даймлер-Бенц (Заявка 3640888 ФРГ, МКИ F 16 D 66/02 от 29.11.86).



Рис. 7.2. Зависимость между износом и разностью температур в узлах трения сталь (Ст. ШХ15)–бронза(Бр. О5Ц5С5) при трении без смазочного материала; испытания при постоянном давлении (0,1 МПа) и переменной скорости (от 0,11 до 0,38 м/с); продолжительность испытаний – 3,6 кс; вставка: материал – ПЭНД, высота – 7 мм, диаметр – 5 мм; термопара – хромель–капель.

Представленные выше конструкции подшипниковых узлов могут стать основой компактных и экономичных диагностических приборов и систем, предусматривающих новую концепцию диагностики машин. Суть этой концепции заключается в следующем. Сложная техническая машина, например, зерноуборочный комбайн или локомотив, состоит из большого числа агрегатов и узлов, наименее надежными элементами которых являются узлы трения.

Весь период работы машины (на примере одного трибосопряжения) можно разделить на три стадии. На первой (участок *OA*, рис. 7.3) происходит приработка контактирующих деталей. Вторая стадия (участок *AB*) характеризует период нормальной эксплуатации – установившегося изнашивания. На третьей стадии (участок диаграммы после т. *B*) происходит катастрофическое изнашивание с последующим прекращением, например, по причине задира, работы деталей трибосопряжений.

Так как узлы трения имеют разные конструкции, технологии их изготовления и ремонта, работают в существенно отличающихся условиях (нагрузка, скорость, вид смазки, среда и т. д.) и имеют свои индивидуальные величины предельного износа, то их предельные состояния (т. *B*) наступают после различных значений пробега (времени) эксплуатации машины.

С экономической точки зрения ремонт целесообразно производить, когда все узлы машины полностью выработают свой ресурс, т. е. их предельные состояния наступят после примерно одинакового пробега или времени эксплуатации (в зоне оптимального ремон-

та S_1–S_2). Практически реализовать такую ситуацию в условиях реальной эксплуатации машин редко когда удается. Выход из сложившейся ситуации может быть найден путем разработки трибодиагностических систем (содержащих в своем составе ЭВМ, устройства ввода-вывода информации, датчики температуры и т. п.), оснащенных так называемыми поддерживающими устройствами (рис. 7.4).

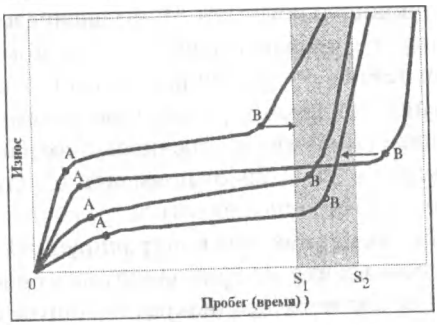


Рис. 7.3. Схема изнашивания узлов трения машины: 0А – период приработки; АВ – период установившегося изнашивания; т. В – переход к катастрофическому изнашиванию.

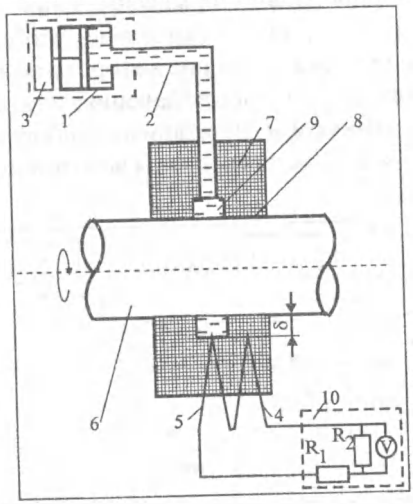


Рис. 7.4. Термодиагностируемый подшипник скольжения с поддерживающим устройством: 1 – исполнительный механизм; 2 – смазочные каналы; 3 – привод; 4, 5 – термопары; 6 – вал; 7 – опора (вкладыш); 8 – зона фрикционного контакта; 9 – смазочный карман; 10 – измерительный блок; δ – предельная величина износа узла.

Поддерживающее устройство может быть выполнено в виде цилиндропоршневого механизма, снабженного приводом и автоматически (по команде ЭВМ) подающего в момент устойчивого перехода узла трения в зону катастрофического изнашивания порцию смазочного материала (или в самом общем случае – вещества, способного снижать трение и восстанавливать изношенные участки поверхности) в зону фрикционного контакта. Поступление в зону трения жидкого, консистентного, твердого или газообразного смазочного материала снижает температуру трения и создает условия для продолжения выполнения машиной (трибосопряжением) своих функций. Поддерживающие устройства обеспечивают сохранение работоспособности узлов трения, позволяют повысить эксплуатационную надежность машин, существенно снизить затраты на последующее восстановление рабочих параметров контролируемых сопряжений.

Одним из основных итогов трибодилатометрических исследований последних лет является неоднократно подтвержденное для узлов трения скольжения существование связи между их износом и дилатацией. На рис. 4.8 приведен один из таких полученных результатов. Из представленных данных следует, что износ трибосистем увеличивается пропорционально их максимальной дилатации. Кроме того, для пары сталь–бронза установлено, что износ также прямо пропорционален времени, в течение которого исследуемая трибосистема приобретает максимальные значения дилатации. Существование связи между износом и дилатацией трибосистем (см. рис. 7.5) позволяет использовать ее для решения некоторых трибологических задач.

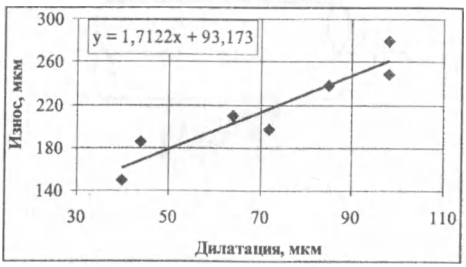


Рис. 7.5. Зависимость между износом и дилатацией сопряжений сталь (ШХ–15) – резина (№ 3826 с покрытием Ф–4 толщиной 0,3–0,4 мкм); условия испытаний: давление – 3 МПа, скорость – 0,25 м/с, трение без смазочного материала.

Рассмотренные выше результаты явились основой для разработки ряда новых исследовательских методик и методов диагностики узлов трения. Так, например, по одному из предложенных нами способов диагностики изнашивания материалов в качестве диагностического параметра предлагается использовать величину дилатации (теплового расширения) фрикционно взаимодействующих материалов трибосистемы, по-другому – используется зависимость скорости изнашивания трибосопряжений от величины их теплового расширения.

Существенная роль теплового фактора в обеспечении триботехнической надежности сопряжений обусловила создание ряда исследовательских методов, предполагающих использование градиентов температуры.

В частности, разработана конструкция машины трения (аналог тестера Т-01), содержащей станину, установленную на ней обойму для размещения пальчиковых образцов материалов и диск, торец которого предназначен для контактирования с исследуемыми образцами. Машина содержит также привод вращения диска и средство для его нагрева. С целью повышения производительности испытаний, средство нагрева диска выполнено в виде термостатов, один из которых установлен на торце диска вдоль его оси со стороны привода, а другие — по периферии диска, охватывая его цилиндрическую поверхность. Градиент температуры, используемый для испытания образцов материалов, создается, например, при помощи высокотемпературного осевого и низкотемпературных периферийных термостатов.

Идея использовать градиент температуры для исследования свойств полимеров и композиций на их основе реализована при создании устройств, позволяющих оценить поверхностную теплостойкость материалов (рис. 7.6).

Устройство содержит основание 1, на котором установлен блок 2 контроля и регулировки температуры и держатель 3 исследуемого образца 4, контактирующего в процессе испытаний со щупом 5. Благодаря кольцеобразной форме щуп имеет возможность перемещаться (катиться) по поверхности образца. В держателе выполнены пазы, служащие для установки в них термостатов-нагревателя 6 и охладителя 7. Распределение температуры по поверхности образца контролируется термопарами 8, размещенными в торцовой поверхности держателя. Устройство снабжено силоизмерительным регистрирующим прибором 9, предназначенным для фиксации и записи силы вза-

имодействия щупа с поверхностью образца. Кроме того, устройство содержит привод 10 относительного перемещения щупа и исследуемой поверхности образца, состоящий из системы блоков и электродвигателя с редуктором.

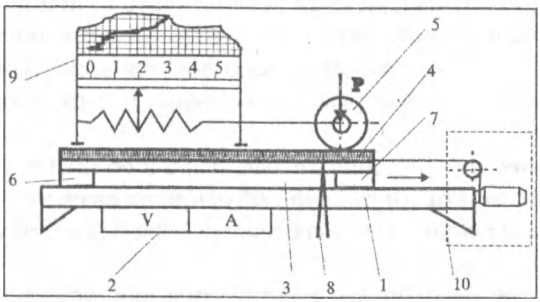


Рис. 7.6. Схема устройства для измерения поверхностной теплостойкости композиционных материалов: 1 – основание; 2 – блок контроля и регулировки температуры; 3 – держатель образца; 4 – исследуемый образец; 5 – щуп; 6, 7 – термостаты (нагреватель и охладитель); 8 – термопара; 9 – регистрирующий прибор; 10 – привод.

Установка в пазах держателя нагревателя и охладителя приводит к неравномерному нагреву образца, т. е. созданию на его поверхности и, соответственно, в объеме материала градиента температур. Путем перемещения (прокатывания) по такому образцу (вдоль направления градиента температуры) щупа, выполненного в форме кольца, и регистрации температуры, при которой будет наблюдаться взаимодействие щупа с материалом образца, быстро и точно определяют температуру поверхностной теплостойкости материалов. Путем подбора режима работы нагревателя и охладителя вдоль поверхности держателя образца возможно создание градиента температуры порядка 2 градусов / 10 мм длины держателя. Это позволяет фиксировать температуру теплостойкости материалов с высокой точностью.

Работоспособность устройства была проверена при исследовании полимерных пленок и тонкослойных покрытий на металлах. Эксперименты проводили на устройстве, принципиальная схема которого приведена на рис. 7.6.

В таблице 7.1 приведены результаты исследований смесей двух порошковых термопластичных полимеров: пентапласта марки А-2 (ППт) и полиэтилена низкого давления (ПЭНД).

Как следует из представленных данных, абсолютные значения

теплостойкости пленок и покрытий существенно отличаются друг от друга. Поверхностная теплостойкость покрытий превосходит аналогичный показатель пленочных образцов. Причем наибольшая разница отмечена для образцов, изготовленных из исходного полиэтилена – практически 50 градусов, наименьшая – для исходного пентапласта – примерно 26 градусов.

Табл. 7.1. Поверхностная теплостойкость полимерных материалов

Вид образца	Состав композиционного материала, мас. % и теплостойкость, К						
	ПЭ 100 %	ПЭ+ ППт 10 %	ПЭ+ ППт 30 %	ПЭ+ ППт 50 %	ПЭ+ ППт 70 %	ПЭ+ ППт 90 %	ППт 100 %
Пленка	394,8	399,3	411,4	428,5	437,2	442,1	439,8
Покрытие	444,5	448,3	458,0	461,0	465,8	469,8	465,8

Примечание: температура формирования пленочных образцов – 483 К, покрытий – 503 К, время – 1,8 кс; пленки сформированы между фторопластовыми пластинами, покрытия – на подложке из алюминия; толщина образцов – от 250 до 300 мкм.

Исследования показали, что теплостойкость пентапластовых покрытий существенно зависит также и от типа металлической подложки, использованной для формирования покрытия. Так, для покрытий, сформированных на свинце, она составила 490,8 К, а для покрытий на меди – 451,8 К. Одной из наиболее вероятных причин столь больших отличий в температурах теплостойкости может быть образование в зоне контакта полимер – металл (и в объеме полимерного покрытия) различного типа металлоорганических соединений.

Добиться существенного расширения функциональных возможностей устройства (рис. 7.6) можно путем установки щупа с возможностью его поворота в вертикальной плоскости и перемещения перпендикулярно поверхности исследуемого образца. Это позволяет получать качественно новые данные о свойствах не только тончайших поверхностных (теплостойкость), но и объемных слоев (прочность при сжатии, твердость, ползучесть, дилатация и др.) материалов.

Подытоживая основные достижения трибодилатометрии последних лет, хотелось бы отметить следующее.

Система разработанных и предложенных терминов и определений трибодилатометрии уже сегодня способствует созданию новых методов исследования закономерностей изменения линейных размеров трибосистем в процессе их испытаний (работы), объективной

трактовке экспериментальных данных, в том числе и тех, которые были получены в трибологических школах разных стран.

Разработанные методологические основы трибодилатометрии позволяют повысить достоверность информации об изнашивании и дилатации трибосопряжений, изготовленных из самых разнообразных конструкционных материалов, а также содержащих детали, на рабочие поверхности которых нанесены тонкие и сверхтонкие покрытия.

Разработанные методики измерений позволяют разделить и численно оценить эффекты дилатации и изнашивания трибосистем. Изучено и проанализировано влияние основных факторов, влияющих на точность и воспроизводимость результатов измерений, включая их статистическую обработку.

Для практической реализации разработанного методического обеспечения может быть использован исследовательский комплект, избирательно формируемый (в соответствии со спецификой решаемых задач) из семейства триботестеров, оснащенных специально разработанным для этих целей прибором – трибодилатометром. Конструкция трибодилатометра позволяет практически полностью устранить то негативное влияние, которое оказывают на точность измерений дилатации и износа радиальные биения трущихся элементов сопряжений.

Результаты оценки износа трибосистем, согласно разработанному методу, достаточно хорошо соответствуют данным, полученным по методике стандарта ASTM G77.

Исследования позволили выявить особенности физико-химических процессов, протекающих в статических и динамических контактах материалов. Показано, что оба вида контактов характеризуются рядом аналогичных явлений. Так, для металлополимерных систем установлена диффузия металла в контактирующие с ним слои полимерного материала, приводящая к изменению их электрических, адгезионных и фрикционных свойств. Для узлов трения, в которых на рабочую поверхность одной из деталей нанесено покрытие эпиламa, с учетом комплекса физико-химических процессов в зоне фрикционного контакта тел, произведено аналитическое описание кинетики изнашивания трибосистем. Предложен температурный критерий, позволяющий определить оптимальные параметры эксплуатации эпиламированных трибоматериалов.

В процессе испытаний узлов трения с различной технологической и эксплуатационной наследственностью определены основные

факторы, обусловливающие погрешности трибодилатационных измерений. Предложен критерий – коэффициент трансформации для оценки влияния наследственности на изнашивание и дилатацию узлов трения.

Экспериментально установлен немонотонный характер изменения термоизносных характеристик трибосопряжений, состоящих из последовательно чередующихся циклов изнашивания и дилатации, амплитуда и продолжительность которых определяются силовыми и кинематическими параметрами трения, характеристиками среды и образующих трущуюся пару материалов. Показано, что термоизносные характеристики синхронизированы и коррелированы с фрикционными по значениям амплитуд и длительностей циклов, обладают памятью фазы и способностью трансформации к упорядоченной циклической форме.

Численный гармонический анализ цикличности экспериментальных зависимостей показал возможность их представления в виде соответствующих тригонометрических многочленов. Выявлено существование связи между параметрами тригонометрических многочленов (гармонических рядов) и шероховатостью поверхности металлического контртела, величинами циклического и полного износа трибосистем.

Разработана методика представления и анализа экспериментальных и расчетных значений амплитуд и длительностей циклов трибологических характеристик путем построения корреляционных квадратов, что позволило предложить конкретные направления совершенствования методического обеспечения трибодилатометрии.

Предложено объяснение и численная оценка параметров феноменологической модели изнашивания и дилатации трибосистем, использующей в качестве основных рабочих параметров значения амплитуд, длительностей циклов и циклического износа сопряжений.

Указанные достижения позволяют в целом оценить уровень современного состояния трибодилатометрии, внесшей, как нам представляется, определенный вклад в развитие трибологической науки, и обозначить ряд проблем, связанных с ее развитием.

По-видимому, одни из самых значительных сложностей ожидают исследователей, взявших на себя труд дальнейшего изучения связи дилатации и изнашивания материалов, в частности, применительно к конкретным типам конструкций узлов трения. Такого рода исследования неизбежно приведут к необходимости изучения и численной оценки тепловых потоков в трибосистемах, их инерционности,

связи с окружающей средой и т. п. Однако трудности, ожидающие исследователей, как нам кажется, с лихвой окупятся теми результатами, которые им предстоит получить.

Достоверность получаемой трибологической информации во многом зависит от методического обеспечения процесса измерений. Безусловно, работы в этом направлении необходимо не только продолжить, но и интенсифицировать. В этом смысле следует с должным вниманием отнестись к тому влиянию, которое оказывает окружающая среда на трибологические характеристики исследуемых трибосистем. В последние годы требования к возможности осуществления контроля и управления состоянием среды при испытании узлов трения стали одними из основных критериев при оценке возможности участия той или иной организации в выполнении заданий по трибологическим проектам, имеющим международное значение.

Известные трудности, существующие сегодня с хранением, обработкой и использованием информации, полученной в процессе трибодилатометрических измерений, могут быть решены в достаточно непродолжительное время путем создания необходимого надежного программного обеспечения и инструментальной связи трибодилатометра с компьютером.

7.2. Перспективные направления трибодилатометрических исследований

Представляя перспективные направления развития трибодилатометрии, следует отметить, что в настоящее время и в обозримом будущем они могут быть реализованы при исследовании как процессов изнашивания, так и дилатации узлов трения. Вместе с тем, нам представляется, что одни из наиболее интересных результатов будут получены при совместном изучении линейного износа и дилатации трибосопряжений. Основанием для такого утверждения является целый ряд новых научных данных, полученных в процессе трибодилатометрических исследований и представленных в настоящей работе.

Изнашивание является одной из основных проблем трибологии. Наиболее актуальные исследования в этом направлении, имеющие общетрибологическое значение, были неоднократно представлены в фундаментальных монографиях и статьях лидеров белорусской, германской и английской трибологических школ. Например, в области трибоматериаловедения к их числу можно отнести исследования изнашивания керамики, самосмазывающихся полимерных композитов, гибридных материалов и т. п.

Безусловно, жизнь постоянно выдвигала, выдвигает и будет выдвигать свои, присущие каждому конкретному этапу развития человеческого общества задачи, в том числе и перед трибологической наукой. Очевидно, что это будет вносить свои коррективы в расстановку приоритетов развития уже существующих и создания новых перспективных направлений исследований. Вместе с тем, есть серьезные основания утверждать, что в первые десятилетия 21-го века сохранят свою актуальность, новизну и практическую значимость следующие направления трибодилатометрических исследований:

1. Разработка унифицированных методов износных и дилатометрических испытаний модельных и натурных узлов трения, включая необходимые для этого компьютеризированные приборы и устройства, с последующим использованием полученных результатов в банках триботехнических данных.

2. Изучение особенностей изнашивания и дилатации материалов при трении с разработкой адекватных моделей фрикционных процессов.

3. Изучение изнашивания и дилатации трущихся сопряжений в экстремальных температурных, нагрузочно-скоростных и временных условиях эксплуатации.

4. Комплексное исследование влияния типа и параметров сред на изнашивание и дилатацию узлов трения.

5. Разработка композиционных материалов с оптимальными параметрами теплового расширения и изнашивания для специальных, например, прецизионных, высокоскоростных и др. подшипниковых узлов.

6. Исследование влияния технологической и эксплуатационной наследственности на изнашивание и дилатацию трибосистем.

7. Создание САПР унифицированных деталей и узлов, а также экономичных диагностических систем и комплексов с использованием данных о дилатации и тепловом состоянии трибосопряжений в качестве основных параметров диагностирования.

8. Разработка высокоэффективных методов, включая необходимые для их осуществления приборы и технические устройства, диагностики изнашивания и дилатации трибосистем в условиях реальной эксплуатации машин и механизмов.

ПОСЛЕСЛОВИЕ

Круг задач, которые в настоящее время могут быть решены при использовании трибодилатометрического метода исследований, достаточно обширен. В известной мере этот факт не является чем-то неожиданным, а лишь следствием того, что трибодилатометрия представляет собой лишь небольшую частью трибологии – науки, сферы интересов и приложений которой поистине необъятны. По мере дальнейшего развития человеческой цивилизации круг этих задач будет постоянно расширяться и усложняться, а сама трибодилатометрия будет развиваться в рамках трибологии и постоянном взаимодействии с такими фундаментальными и прикладными науками, как физика, механика, термодинамика, детали машин и др. В этой связи автор отдает себе отчет об известной скромности своего труда, конечно же не лишенного недостатков, и представляющего собой первую попытку обобщения этой небольшой области человеческого знания.

В известной степени ограниченный объем книги, а также недоступность некоторых информационных источников, публикующих работы по трибологической тематике, привели к вполне неизбежным упущениям в цитировании работ ряда как известных, так и ещё делающих свои первые шаги в трибологии ученых. В этой связи автор приносит им свои извинения и по возможности постарается ликвидировать этот пробел в будущем.

Принимая во внимание дискуссионность многих высказанных положений, автор с благодарностью примет все пожелания и замечания заинтересованных исследователей которые просит направлять на E-mail: POTEKHA@CHAT.RU. Дальнейшее развитие теории и практики трибодилатометрии будет способствовать более глубокому познанию природы процессов трения, изнашивания и смазки материалов.

Безусловно, невероятно сложно перечислить все трудности, ожидающие исследователей, которые будут использовать трибодилатометрический метод в своей практической деятельности. Более того, можно с полной уверенностью утверждать, что у каждого из них трудности и проблемы будут иметь свою, так сказать, «местную» специ-

фику. По этой причине практически невозможно было в рамках настоящей книги научить всему, что помогло бы преодолеть сложности и трудности, решить проблемы, возникшие в процессе тех или иных трибодилатометрических испытаний сопряжений. Остается только пожелать всем последователям данного метода и исследователям в этом направлении трудолюбия, терпения, удачи и самое главное – веры в достижение поставленных перед собой целей.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)
[21, 105, 699, 933]

Точное логическое определение понятий – главнейшее условие истинного знания

СОКРАТ

Краткий трибологический словарь терминов и понятий

А

АБРАЗИВНОЕ ИЗНАШИВАНИЕ (abrasive wear) — механическое *изнашивание* материала в результате режущего или царапающего действия твердых тел или твердых частиц, находящихся в закрепленном или свободном состоянии.

АБРАЗИВНЫЕ ЧАСТИЦЫ (abrasive particles) — твердые частицы, наличие которых в зоне трения вызывает абразивное *изнашивание* и повреждаемость деталей машин.

АБСОРБЦИЯ (absorption) — объемное поглощение вещества жидкостью или твердым телом. Поглощающее вещество называют абсорбентом, поглощаемое – абсорбатом. А. обусловлена как диффузией абсорбатов в абсорбенты, так и процессами растворения.

АДГЕЗИОННАЯ (МОЛЕКУЛЯРНАЯ) СОСТАВЛЯЮЩАЯ СИЛЫ ТРЕНИЯ (adhesion component of force friction) — составляющая *силы трения*, связанная с преодолением адгезионных (молекулярных) связей в контактной зоне.

АДГЕЗИОННОЕ ИЗНАШИВАНИЕ (adhesive wear process) — *изнашивание*, обусловленное разрушением фрикционных (молекулярных) связей. Предельным случаем А. и. является изнашивание при заедании.

АДГЕЗИЯ (ПРИЛИПАНИЕ) (adhesion) — связь между приведенными в контакт разнородными поверхностями. Причины возникновения адгезионной связи – действие межмолекулярных сил или сил химического воздействия.

АДСОРБЦИЯ (adsorption) — концентрация жидких или газообразных веществ (адсорбатов) на поверхностях твердых тел или жидкостей (адсорбентов), происходящая в результате взаимодействия полей адсорбента и адсорбата.

АНТИФРИКЦИОННАЯ СМАЗКА (antifriction lubricant) — пластичная смазка для уменьшения потерь на *трение скольжения*. В зависи-

мости от применяемого загустителя А. с. делятся на следующие группы: кальциевые, комплексные кальциевые, натриевые и натриевокальциевые, литиевые, бариевые, алюминиевые, органические, на неорганических загустителях, в т. ч. силикагелевые углеводородные.

АНТИФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА (tribological properties) — *триботехнические свойства* антифрикционных материалов. К основным А. с. относят *износостойкость* и коэффициент внешнего трения. Их дополняют такие характеристики, как прирабатываемость, несущая способность материала, предельно допустимые нагрузки, температура и др.

АНТИФРИКЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ (antifriction material) — материал, обладающий низким *коэффициентом трения* или самосмазывающими свойствами. Предназначен для деталей, работающих в условиях трения, главным образом, скольжения (подшипники, втулки, направляющие, вкладыши).

Б

БАББИТ (Babbitt metal) — подшипниковый сплав, предложенный в 1839 г. И. Баббитом. В настоящее время этим термином обозначают группу сплавов на основе олова, свинца или кадмия с различными добавками.

БАЗОВОЕ МАСЛО (base oil) — смазочное масло, к которому добавляется одна или несколько присадок с целью получения готового продукта.

БЕЗЫЗНОСНОСТЬ (wearlessness) — способность *трибосистемы* реализовывать в определенных условиях испытания практически несущественные уровни интенсивности изнашивания (*нулевой износ*). Возможна в условиях специальной граничной смазки при *избирательном переносе*, который был обнаружен Д. Н. Гаркуновым и И. В. Крагельским при работе пары трения сталь–латунь в среде глицерина.

В

ВИД ИЗНАШИВАНИЯ (wear mode / type) — группа процессов изнашивания, классифицированных по видам и уровням внешних воздействий, механизмам изнашивания, его результатам или внешним проявлениям. Виды *изнашивания* могут классифицироваться по одному или одновременно нескольким из указанных признаков.

ВНЕШНЕЕ ТРЕНИЕ (external friction) — явление сопротивления относительному перемещению, возникающему между прижатыми друг к другу телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним, сопровождаемое *диссипацией энергии*.

ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ (internal friction) — явление сопротивления относительному перемещению частей одного и того же тела. (В жид-

костях и газах – то же, что и вязкость, в твердых телах – свойство твердых тел необратимо превращать в теплоту механическую энергию, сообщенную телу в процессе его деформирования).

ВОДОРОДНОЕ ИЗНАШИВАНИЕ (hydrogen wear) — процесс поверхностного разрушения металлического *элемента пары трения* вследствие поглощения металлом водорода.

ВОЛНИСТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ (waviness) — характеристика поверхности, определяемая совокупностью регулярно чередующихся и близких по размерам возвышений и впадин, образующихся при механической обработке материалов из-за неравномерности усилий резания и колебаний в системе станок–инструмент–изделие.

Г

ГАЗОВАЯ СМАЗКА (gas lubrication) — *смазка*, при которой разделение поверхностей трения деталей осуществляется газовым *смазочным материалом*.

ГАЗОЭРОЗИОННОЕ (ГИДРОЭРОЗИОННОЕ) ИЗНАШИВАНИЕ (gasoerosive / hydroerosive wear) — *изнашивание* поверхности в результате воздействия высокоскоростного и высокотемпературного потока газа (пара).

ГИДРОАБРАЗИВНОЕ (ГАЗОАБРАЗИВНОЕ) ИЗНАШИВАНИЕ (hydroabrasive / gasoabrasive wear) — абразивное *изнашивание* поверхности в результате действия твердых тел или частиц, увлекаемых потоком жидкости (газа). В англоязычной литературе используется термин «abrasive erosion» (абразивная эрозия).

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ (ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ) СМАЗКА (hydrodynamic (aerodynamic) lubrication) — жидкостная (*газовая*) *смазка*, при которой полное разделение поверхностей трения осуществляется в результате давления, самовозникающего в слое жидкости (газа) при относительном движении поверхностей.

ГИДРОСТАТИЧЕСКАЯ (ГАЗОСТАТИЧЕСКАЯ) СМАЗКА (hydrostatic (aerostatic) lubrication) — жидкостная (*газовая*) *смазка*, при которой полное разделение поверхностей трения осуществляется в результате поступления жидкости (газа) в зазор между *поверхностями трения* под внешним давлением.

ГРАДИЕНТ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ (mechanical gradient) — вектор, характеризующий изменение механических свойств *элемента пары трения* по нормали к поверхности трения. При положительном Г. м. с. возникает внешнее трение, при отрицательном – *заедание*, схватывание, глубинное вырывание.

ГРАНИЧНАЯ СМАЗКА (boundary lubrication) — *смазка*, при которой трение определяется свойствами тонкого слоя компонентов жидкого смазочного материала, отличающимися от свойств того же смазочно-

го материала в объеме и обусловленными взаимодействием материала *поверхностей трения, смазочного материала* и среды.

ГРАНИЧНЫЕ СЛОИ (МАСЛЯНОЙ ПЛЕНКИ) (boundary films) — слои, возникающие в результате *адсорбции* полярных молекул углеводородов на поверхности твердых тел (металлов) под воздействием поля твердой фазы.

Д

ДЕФОРМАЦИОННАЯ (МЕХАНИЧЕСКАЯ) СОСТАВЛЯЮЩАЯ СИЛЫ ТРЕНИЯ (deformation component of friction force) — суммарное сопротивление скольжению, обусловленное деформированием поверхностного слоя менее жесткого *элемента пары трения*.

ДЕФОРМАЦИЯ ПРИ ТРЕНИИ (strain, deformation) — изменение формы и (или) размеров тела (или какой-либо его части) под действием как механического, так и температурного нагружения. В определенных условиях может вносить существенный вклад в работу трения и *интенсивность изнашивания* трибосистем.

ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ (ПРИ ТРЕНИИ) (nondestructive testing) — контроль качества (состояния) трибосопряжения, позволяющий обнаружить дефекты на основе определения и оценки косвенных признаков.

ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ ПРИЗНАК (ПАРАМЕТР) (diagnostic parameter) — признак (параметр) объекта диагностирования, используемый для определения технического состояния объекта. В *триботехнике*, например, Д. п. являются *сила трения*, изменение линейных размеров отдельного элемента (элементов) или *трибосистемы* в целом.

ДИЛАТАЦИЯ (dilatation) — расширение, растяжение.

ДИСЛОКАЦИОННАЯ ТЕОРИЯ ТРЕНИЯ (dislocational theory of friction) — теория, основанная на гипотезе об образовании субмикрорельефа *поверхности трения*, обусловленного перемещением *дислокаций*.

ДИСЛОКАЦИЯ (dislocation) — линейный дефект кристаллической решетки, нарушающий правильное чередование атомных плоскостей. Присутствие дислокаций изменяет *поверхностную энергию*, что, в свою очередь, влияет на кинетику взаимодействия с окружающей средой и на процессы трения и изнашивания.

ДИССИПАЦИЯ ЭНЕРГИИ (energy dissipation) — процесс перехода энергии упорядоченного процесса, в конечном счете, в теплоту. Например, в узлах трения полная механическая энергия при движении непрерывно уменьшается (рассеивается), переходя в другие, немеханические виды энергии (теплоту).

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ УЗЛА ТРЕНИЯ (service life of friction unit, durability) — свойство узла трения сохранять работоспособность до наступления *предельного состояния* при установленной системе техничес-

кого обслуживания и ремонта.

ДОПУСТИМЫЙ ИЗНОС (permissible wear) — значение износа, при котором изделие сохраняет работоспособность.

Ж

ЖИДКОСТНАЯ СМАЗКА (liquid-film lubrication) — смазка, при которой полное разделение *поверхностей трения* деталей осуществляется жидким *смазочным материалом*.

З

ЗАДИР (scoring, scuffing) — повреждение *поверхности трения* в виде широких и глубоких борозд в направлении скольжения. З. является одним из видов катастрофического *износа*.

ЗАЕДАНИЕ (seizure) — процесс возникновения и развития повреждений *поверхностей трения* вследствие схватывания и *переноса материала*. З. может завершаться прекращением относительного движения.

ЗУБЧАТАЯ ПЕРЕДАЧА (gearing) — трехзвенный механизм, в котором два подвижных звена являются зубчатыми колесами, образующими с неподвижным звеном вращательную или поступательную пару. Основные виды поверхностного разрушения зубьев – усталостный, абразивный, адгезионный, коррозионный, при заедании.

И

ИЗБИРАТЕЛЬНЫЙ ПЕРЕНОС (selective transfer) — обратимый массоперенос структурных или химических компонентов материалов сопряженных тел путем их избирательного растворения и осаждения на *поверхностях трения* (эффект Гаркунова–Крагельского).

ИЗНАШИВАНИЕ (wear process) — процесс отделения материала с поверхности твердого тела и (или) увеличения его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела.

ИЗНАШИВАНИЕ РАССЛАИВАНИЕМ (delamination wear) — изнашивание, при котором зарождение и рост подповерхностных трещин приводит к образованию пластинчатых частиц износа.

ИЗНОС (wear) — результат *изнашивания*, определяемый в единицах длины (линейный И.), объема (объемный И.), массы (массовый И.).

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ (wear resistance) — свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения. Оценивается величиной, обратной скорости или *интенсивности изнашивания*.

ИНГИБИТОРЫ ИЗНАШИВАНИЯ (inhibitors of wear) — компоненты *трибосистемы*, образующиеся в процессе ее эксплуатации или введенные извне, способствующие подавлению неблагоприятного цикла физико-химических процессов и увеличивающие ее *износостойкость*.

ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗНАШИВАНИЯ (wear intensity) — отношение *износа* к пути, на котором происходило изнашивание, или объему выполненной работы.

ИСПЫТАНИЯ НА ТРЕНИЕ (ИЗНАШИВАНИЕ) (friction/ wear test) — испытания, проводимые с целью изучения параметров и определения количественных характеристик процесса трения и изнашивания (*коэффициент трения, интенсивность изнашивания* и т.д.). Различают лабораторные, стендовые, натурные, эксплуатационные, ускоренные и др. И.

ИСТИРАНИЕ (attrition) — удаление малых фрагментов поверхностного слоя при *трении скольжения*.

К

КАТАСТРОФИЧЕСКИЙ ИЗНОС (catastrophic wear) — результат интенсивного разрушения *поверхности трения*, выражающийся в пластической деформации поверхностных слоев, возникновении местных металлических связей на трущихся поверхностях и разрушении этих связей с отделением частиц металла или налипании их на поверхность трения.

КЛАСС ИЗНОСОСТОЙКОСТИ (wear resistance class) — показатель качества деталей подвижных сочленений машин, характеризуемый определенным интервалом значений *интенсивности изнашивания*.

КОНТАКТНАЯ УСТАЛОСТЬ (contact fatique, rolling-contact wear) — процесс накопления и разрушения поверхностного слоя материала под действием повторно переменных контактных нагрузок при *трении качения*, который ведет к появлению трещин, износу отслаиванием, образованию ямок выкрашивания (питтингов).

КОНТРТЕЛО (КОНТРОБРАЗЕЦ) (counterbody) — *элемент пары трения*, фрикционно взаимодействующий с испытуемым материалом (образцом).

КОЭФФИЦИЕНТ ВЗАИМНОГО ПЕРЕКРЫТИЯ (overlapping factor, mutual overlap coefficient) — отношение произведения контурных площадей трения контактирующих *элементов пары трения* к квадрату условной контурной площади трения, получаемой передвижением этих элементов вокруг центра вращения.

КОЭФФИЦИЕНТ ТЕРМИЧЕСКОГО (ЛИНЕЙНОГО) РАСШИРЕНИЯ (coefficient of thermal expansion) — относительное изменение длины тела при изменении его температуры на 1 К.

КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ (coefficient of friction) — отношение силы трения двух тел к нормальной силе, прижимающей эти тела друг к другу.

КРИТЕРИЙ (ФАКТОР) pv (pv product / factor, pressure-velocity parameter) — произведение нормального давления в контакте на скорость скольжения, используемое для оценки износостойкости и работоспособности антифрикционных материалов и узлов трения. Служит также для построения в координатах $\lg p - \lg v$ области допустимого износа (безопасной работы). Граница этой области дает предельно допустимое значение критерия, а внутренние точки этой области соответствуют его рабочему значению.

Л

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА ТРЕНИЕ И ИЗНАШИВАНИЕ (laboratory tests for friction and wear) — испытания, проводимые в строго контролируемых условиях при полной и точной регистрации исследуемых параметров.

ЛИНЕЙНЫЙ ИЗНОС (linear wear) — высота изношенной части отдельного *элемента* (элементов) или *трибосистемы* в целом.

М

МАЛОЦИКЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ (low-cycle fatique) — усталость материала в таких условиях, когда повреждение и разрушение происходит при упругопластическом деформировании.

МАШИНА ТРЕНИЯ (friction/wear machine) — испытательная установка, предназначенная для исследования материалов трения. Различают специализированные М. т. (для испытания одного типа изделий и материалов в строго определенных условиях) и универсальные М. т. (для испытания различных деталей и изделий в широко изменяющихся условиях).

МЕТОДИКА ТРИБОИСПЫТАНИЙ (tribotest technique) — организационно-методический документ, обязательный к выполнению, включающий описание метода испытаний, средств и условий испытаний, последовательности отбора проб, алгоритмы выполнения операций по определению одной или нескольких взаимосвязанных характеристик свойств трибосопряжения (узла трения), формы представления данных и оценку точности и достоверности результатов, требований техники безопасности и охраны окружающей среды.

МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ НА ТРЕНИЕ И ИЗНАШИВАНИЕ (friction and wear test methods) — принципы и правила, соблюдение которых позволяет экспериментально определять характеристики *износос-*

тойкости пары трения с требуемой точностью и в течение заданной продолжительности испытания в отдельных условиях.

МОЩНОСТЬ ТРЕНИЯ (friction power) — отношение работы трения к времени скольжения.

Н

НАВОЛАКИВАНИЕ (galling) — явление *переноса* или перемещения больших фрагментов материала вдоль *поверхности трения* или с одной контактирующей поверхности на другую. Предельным случаем Н. может быть *заедание*, когда внешнее трение переходит во внутреннее.

НАДЕЖНОСТЬ В ТРИБОТЕХНИКЕ (reliability in triboengineering) — свойство трибообъекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования.

НАНОТРИБОЛОГИЯ (nanotribology) — трибология объектов нанометрического масштаба, включая молекулярно гладкие поверхности.

НАРАБОТКА УЗЛА ТРЕНИЯ (friction unit running / operating time) — продолжительность или объем работы узла трения.

НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ (full-scale tests) — исследование работоспособности натурного узла трения на стенде с учетом его конструкционного оформления, позволяющее определить температурное поле в узле трения, его жесткость и эпюру нагрузок. При Н. и., в отличие от эксплуатационных испытаний, можно производить точные измерения и регистрацию параметров и выдерживать тождественные условия при сравнительных испытаниях узлов трения различной конструкции с использованием различных материалов и смазок.

НОРМАЛЬНОЕ ИЗНАШИВАНИЕ (normal wear) — *изнашивание* материала в пределах, предусмотренных расчетом для данного узла трения в заданных условиях эксплуатации.

НУЛЕВОЙ ИЗНОС (zero wear) — *износ* материала, не регистрируемый измерительной системой.

О

ОБРАЗЦЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ НА ТРЕНИЕ И ИЗНОС (wear specimen) — образцы, предназначенные для экспериментального определения характеристик *износостойкости* материала.

ОПТИМАЛЬНАЯ ПАРА ТРЕНИЯ (optimal friction pair) — пара трения, обеспечивающая наиболее эффективную эксплуатацию узла в заданных условиях.

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ (relative wear resistance) — отношение *интенсивности изнашивания* одного материала к интенсивности изнашивания другого материала в одинаковых условиях. Обычно один из материалов принимается за эталон.

ОТСЛАИВАНИЕ (spalling, flaking) — отделение с *поверхности трения* материала в форме чешуек при усталостном изнашивании.

П

ПАРА ТРЕНИЯ (friction pair) — система из двух элементов (материалов), соприкасающиеся поверхности которых в процессе работы перемещаются (скользят) относительно друг друга. Один элемент системы называют материалом трения, а другой – контртелом.

ПЕРЕНОС МАТЕРИАЛА (transfer of material) — явление при трении твердых тел, состоящее в том, что материал одного тела соединяется с другим и, отрываясь от первого, остается на поверхности второго.

ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ (plastic deformation, plastic strain) — деформация, не исчезающая после устранения воздействия вызывающих ее внешних нагрузок.

ПОВЕРХНОСТНАЯ ЭНЕРГИЯ (surface energy) — избыток энергии поверхностного слоя по сравнению с энергией вещества внутри тела, обусловленный различием межмолекулярных взаимодействий. Свободная П. э. линейно уменьшается с ростом температуры. П. э. влияет на адгезию и адсорбцию.

ПОВЕРХНОСТЬ ТРЕНИЯ (tribosurface) — поверхность твердого тела, контактное взаимодействие которой с другой поверхностью или поверхностями приводит к трению и изнашиванию.

ПОДШИПНИК КАЧЕНИЯ (rolling-element bearing) — опора вала или вращающейся оси, воспринимающая от них радиальные, осевые и радиально-осевые нагрузки и обеспечивающая их свободное вращение, в которых между поверхностью вращающейся детали и поверхностью опоры расположены шарики или ролики.

ПОДШИПНИК СКОЛЬЖЕНИЯ (plain journal bearing) — опора вала или вращающейся оси, воспринимающая от них радиальные, осевые и радиально-осевые нагрузки и обеспечивающая их свободное вращение, в которых цапфа вала скользит непосредственно по опорной поверхности.

ПОКРЫТИЕ (coating) — слой или несколько слоев, наносимые на поверхность трущейся детали с целью придания ей специфических эксплуатационных свойств и экономии дефицитных материалов.

ПРАВИЛО ШАРПИ (Charpy rule) — правило выбора фрикционных (антифрикционных) сплавов для подшипниковых узлов, согласно которому материал должен состоять из твердых зерен, распределенных в пластичной массе.

ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ УЗЛА ТРЕНИЯ (limiting state) — состояние узла трения, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо из-за неустранимого нарушения работоспособного состояния.

ПРЕДЕЛЬНЫЙ ИЗНОС (limiting wear) — износ, соответствующий *предельному состоянию* изнашиваемого изделия или его составной части.

ПРИРАБОТКА (running-in, wear-in) — процесс изменения геометрии *поверхностей трения* и физико-механических свойств поверхностных слоев материала в начальный период трения, обычно сопровождающийся (при постоянных внешних условиях) уменьшением *силы трения* и *интенсивности изнашивания*.

ПРИСПОСАБЛИВАЕМОСТЬ ТРИБОСИСТЕМЫ (adaptability) — свойство *трибосистемы* при внешнем воздействии изменять и устойчиво самовоспроизводить свою структуру в энергетически выгодном направлении (способность трибосистемы реализовывать самопроизвольный переход к устойчивому состоянию, проявляющемуся в возникновении и устойчивом самовоспроизведении макро- и микрогеометрии поверхности и градиентов температуры, и возможность поддерживать его при изменении внешних воздействий).

ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ИСПЫТАНИЙ (test time) — продолжительность нахождения нагруженного образца в режиме испытаний. П. и. может быть выражена числом циклов или интервалом времени.

Р

РАБОТА ТРЕНИЯ (friction work) — энергия, передаваемая парой трения окружающей среде и материалу *элементов пары трения* при изменении внешних параметров, например, положения в пространстве, сопротивления движению, объема, электрического поля и др., определяемая произведением *силы трения* на путь трения.

С

САМОСМАЗЫВАНИЕ (self-lubrication) — свойство пары трения образовывать в зоне фрикционного контакта смазочные слои за счет смазочных веществ, помещенных в теле одного из *элементов пары трения*.

СИЛА ТРЕНИЯ (friction force) — сила сопротивления относительному перемещению одного тела по поверхности другого при действии нагрузки, направленная по касательной к общей границе между этими телами.

СИСТЕМА ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИА-

ЛОВ (tribological system for materials testing) — совокупность функционально взаимосвязанных технических устройств, методов исследований и исполнителей для выполнения в регламентированных условиях испытаний модельных и (или) натурных узлов трения.

СКОЛЬЖЕНИЕ (sliding) — движение двух тел относительно друг друга, при котором их скорости на общем участке поверхности контакта различны по величине и (или) направлению.

СКОРОСТЬ ИЗНАШИВАНИЯ (wear rate) — отношение значения износа к интервалу времени, в течение которого он возник. Различают мгновенную и среднюю скорость изнашивания.

СМАЗКА (lubrication / type of) — действие *смазочного материала*, в результате которого между двумя поверхностями уменьшаются износ, повреждения поверхности и (или) сила трения.

СМАЗОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ (lubricant) — материал, подаваемый на *поверхность трения* для уменьшения *силы трения* и (или) *интенсивности изнашивания*.

СМАЗЫВАНИЕ (lubrication // method of) — процесс подведения *смазочного материала* к *поверхности трения*.

СОВМЕСТИМОСТЬ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ТРЕНИИ (frictional compatibility) — свойство материалов сопряженных поверхностей предотвращать схватывание при трении. Обеспечивается при выполнении правила положительного *градиента механических свойств*.

СТОЙКОСТЬ ТРИБОСИСТЕМЫ (tribosystem stability) — свойство трибосистем сопротивляться деструктивным проявлениям трения. Отражается в показателях износо-, задиро- и фрикционной теплостойкости.

СТРУКТУРА ТРИБОСИСТЕМЫ (structure of tribosystem) — элементы *трибосистемы*, их свойства и связи между ними, возникающие в процессе трения.

Т

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ (thermal deformation) — деформация, возникающая вследствие изменения температуры тела.

ТЕОРИЯ ТРЕНИЯ (ИЗНАШИВАНИЯ) (friction theory) — система представлений об основных закономерностях процесса трения (изнашивания), базирующаяся на его идеализации и выделении ведущего механизма взаимодействия трущихся тел.

ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС (heat balance) — распределение тепла, генерируемого на *поверхностях трения*, между элементами фрикционной пары, окружающей средой, смазкой, продуктами износа, при механохимических и других превращениях.

ТЕПЛОВОЕ ИЗНАШИВАНИЕ (thermal wear) — процесс разруше-

ния поверхностей деталей машин при трении, обусловленный нагревом зоны контакта до температуры размягчения, плавления или испарения материала.

ТЕРМОИЗНОСНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА (thermal wear characteristic) — кинетическая зависимость номинального линейного размера *трибосистемы* или ее отдельных элементов от *износа* и *дилатации*.

ТЕРМОИЗНОСНОЕ СОСТОЯНИЕ (thermal wearing) — состояние элемента или всей *трибосистемы*, характеризующееся одновременно протекающими процессами *изнашивания* и *дилатации*.

ТРЕНИЕ КАЧЕНИЯ (rolling friction) — трение движения двух соприкасающихся твердых тел, при котором их скорости в точках касания одинаковы по значению и направлению.

ТРЕНИЕ ПОКОЯ (static friction) — трение двух тел при микросмещениях без макросмещений.

ТРЕНИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ (sliding friction) — трение движения, при котором скорости тел в точке касания различны по значению и (или) направлению.

ТРЕТЬЕ ТЕЛО (third body) — название зоны фрикционного взаимодействия контактирующих тел, в которой расположены фрикционные связи, а также заполняющие пространство между ними смазка (загрязнения) и продукты износа.

ТРИБОАНАЛИЗ (tribоscience) — раздел *трибологии*, охватывающий проблемы накопления и систематизации научной информации о фундаментальных исследованиях основных фрикционных процессов с целью прогнозирования результатов контактного взаимодействия твердых тел в заданных условиях. Разделами Т. являются трибомеханика, трибофизика, трибохимия, а также трибобиология.

ТРИБОАНАЛИЗАТОР (triboanylizer) — устройство, являющееся частью *трибометра* и предназначенное для исследования процессов, сопровождающих трение, принцип действия которого основан на использовании одного или нескольких фундаментальных физических явлений, например, акустической эмиссии, дилатации, магнитострикции, поляризации и др.

ТРИБОДИАГНОСТИКА (tribodiagnostics) — раздел *трибологии*, в котором изучают совокупность методов и средств непрерывного контроля состояния фрикционных параметров деталей и узлов машин. Трибодиагностика входит в состав *трибомониторинга*.

ТРИБОДИЛАТОМЕТР (tribodilatometer) — трибоанализатор, принцип действия которого основан на регистрации изменения номинального линейного размера трибосистемы или ее отдельных элементов.

ТРИБОДИЛАТОМЕТРИЯ (tribological dilatometry) — одно из направлений *трибодиагностики*, предметом которого являются закономер-

ности изменения размеров *трибосистем* или их отдельных элементов в результате трения при воздействии факторов окружающей среды.

ТРИБОИНФОРМАТИКА (triboinformatics) — раздел *трибологии*, в котором изучают закономерности получения трибологической информации, ее преобразования, хранения и передачи для использования в науке, образовании и производстве.

ТРИБОЛОГИЯ (tribology) — наука о явлениях и закономерностях трения, изнашивания, смазки и взаимодействия контактирующих тел при их взаимном перемещении. Как наука Т. имеет разделы: трибомеханика, трибофизика, трибохимия, *химмотология*, *триботехника*, *триботехническое материаловедение*, *трибоинформатика*, *трибомониторинг* и др.

ТРИБОМАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ (tribomaterials science) — раздел трибологии, в котором изучают строение и свойства материалов триботехнического назначения, например, антифрикционных материалов.

ТРИБОМЕТР (ТРИБОТЕСТЕР) (tribometer) — лабораторная измерительная установка для исследования и измерения величин, характеризующих трение материалов. Т. можно считать любую машину трения.

ТРИБОМЕТРИЯ (tribometry) — раздел трибологии, в котором изучают методы проведения испытаний на трение и изнашивание, а также технику измерений преимущественно механических характеристик фрикционного взаимодействия твердых тел. Трибометрия является составной частью трибомониторинга.

ТРИБОМОНИТОРИНГ (tribomonitoring) — раздел *трибологии*, включающий *трибометрию* и *трибодиагностику*, в котором изучают совокупность средств и методов испытаний, диагностики, непрерывного контроля и регулирования характеристик подвижных сопряжений.

ТРИБОСИСТЕМА (tribosystem) — совокупность всех участвующих в процессе трения и изнашивания *трибоэлементов*, их свойств и связей, параметров, воздействующих на трибоэлементы извне, а также характеристик трения и изнашивания / сложная термодинамическая система, образуемая при взаимодействии трущихся тел, а также промежуточной среды и части окружающей среды.

ТРИБОСОПРЯЖЕНИЕ (triboconjunction) — сложная термодинамическая система, в которой происходит преобразование энергии механического движения в другие виды, в основном, менее упорядоченные: тепло, колебания и т. д. – передача преобразованной энергии окружающей среде.

ТРИБОТЕХНИКА (triboengineering) — прикладной раздел *трибологии*, который охватывает конечную стадию процесса создания трибосопряжений (узлов, деталей и элементов пар трения) с учетом достижений трибоанализа, трибоматериаловедения и триботехнологии.

ТРИБОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ (triboengineering materials science) — раздел *трибологии*, в котором изу-

чают поведение материалов при трении (изменение структурно-фазовых особенностей поверхностных слоев трения металлов, сплавов, полимеров и других под воздействием силы трения, скорости, температуры трения, окружающей среды и других производных от них факторов) с учетом закономерностей трения и изнашивания. Т. м. разрабатывает принципы создания триботехнических материалов с высокой степенью надежности в эксплуатации.

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА (tribological properties) — свойства *трибосистемы* и (или) ее элементов, характеризующие качество функционирования трибосистемы в заданных условиях нагружения и среды или в определенном диапазоне этих условий.

ТРИБОТЕХНОЛОГИЯ (tribotechnology) — раздел *трибологии*, в котором изучают процессы формообразования изделий во взаимосвязи с получением требуемых триботехнических характеристик *поверхностей трения*.

ТРИБОЭЛЕМЕНТ (triboelement) — твердое тело, ограниченное одной или более поверхностями трения, и входящее в *трибосистему*.

У

УЗЕЛ ТРЕНИЯ (friction unit) — кинематическая пара, в которой реализуется трение скольжения или качения с проскальзыванием.

УПЛОТНЕНИЕ (seal) — устройство для разделения сред, предотвращения или уменьшения до допустимых пределов утечки сред через подвижные или разъемные неподвижные соединения. Работоспособность уплотнений определяется их герметизирующей способностью, которая, в свою очередь, зависит от качества сопрягаемых поверхностей, природы уплотняемой среды, процессов трения и изнашивания (например, фреттинг-коррозии) и других факторов.

УПРУГАЯ ДЕФОРМАЦИЯ (elastic strain / deformation) — независящая от времени деформация, исчезающая после устранения воздействия вызывающих ее внешних нагрузок.

УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА ИЗНОС (accelerated wear tests) — испытания узлов трения, методы и условия которых обеспечивают получение необходимой информации об износостойкости в более короткий срок, чем при стандартных испытаниях или в эксплуатации.

УСТАЛОСТНОЕ ИЗНАШИВАНИЕ (fatique wear) — механическое изнашивание в результате усталостного разрушения при повторно-переменном деформировании микрообъемов материала поверхностного слоя, сопровождающееся возникновением трещин и отделением частиц материала.

УСТАЛОСТЬ (fatique) — процесс постепенного накопления повреждений материала и его разрушение под действием переменных напряже-

ний, не превышающих предела упругости.

Ф

ФЕРРОГРАФИЯ (ferrography) — метод анализа проб масла, основанный на осаждении ферромагнитных и парамагнитных частиц износа из потока смазки под влиянием высокого градиента магнитного поля, направленного перпендикулярно потоку. В настоящее время Ф. применяется и для анализа неметаллических материалов.

ФРИКЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ (frictional interaction) — процесс непрерывного формирования пятен касания при трении под действием нормальных и тангенциальных сил.

ФРИКЦИОННО-ИЗНОСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ (frictional characteristics) — характеристики пары трения или узла трения, получаемые в результате испытаний и характеризующие их эксплуатационные свойства: зависимости *коэффициента трения* и *интенсивности изнашивания* от температуры (скорости) и (или) нагрузки, стабильность коэффициента трения и его колебания, прирабатываемость.

ФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ (frictional materials) — материалы трения, предназначенные или используемые для работы в узлах, передающих или рассеивающих кинетическую энергию (тормозах, муфтах, сцеплениях, демпферах и др.).

ФРИКЦИОННЫЙ ПЕРЕНОС (friction transfer) — явление переноса материала контактирующих при трении тел с одной поверхности на другую.

Х

ХЕМОСОРБЦИЯ (ПРИ ТРЕНИИ) (chemisorption) — механизм образования соединений на *поверхностях трения* в результате поглощения газов, паров и растворенных веществ жидкими или твердыми сорбентами с образованием на поверхностях раздела новой фазы или компонента.

ХИММОТОЛОГИЯ (chemmotology) — наука о физико-химических свойствах топлив, *смазочных материалов* и специальных жидкостей, их испытаниях и применении в технике.

Ц

ЦАПФА (journal) — часть вала или оси, которая вращается или колеблется относительно радиального подшипника.

Ч

ЧИСТОЕ КАЧЕНИЕ (pure rolling) — идеальный вид качения, т. е. качение без взаимного проскальзывания отдельных участков поверхностей.

Ш

ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ (roughness) — совокупность неровностей обработанной поверхности с относительно малыми шагами на базовой длине, образующих ее рельеф.

Э

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ (service tests) — испытания узлов трения, проводимые в условиях эксплуатации. При Э. и. устанавливается взаимовлияние различных узлов механизма и дается оценка надежности работы механизма в целом.

ЭЛЕМЕНТ ПАРЫ ТРЕНИЯ (friction pair element / member) — один из элементов (или материалов), участвующих в трении.

ЭЛЕМЕНТ ТРИБОСИСТЕМЫ (triboelement) — контактирующие тела, *смазочный материал* и окружающая среда, непосредственно участвующие в процессе трения.

Ю

ЮВЕНИЛЬНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ (nascent surface) — поверхность, лишенная каких-либо загрязнений, например, образованная при разрушении твердого тела в идеальном вакууме.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Ни одной достоверности нет в науках там, где нельзя приложить ни одной из математических наук, и в том, что не имеет связи с математикой
ЛЕОНАРДО ДА ВИНЧИ

Б.1. Основные формулы и таблицы математической статистики

Б.1.1. Среднее арифметическое величин $x_1, x_2, \ldots, x_n$

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \ldots + x_n}{n} = \frac{\sum_1^n x_i}{n}.$$

Б.1.2. Абсолютная погрешность

$$\Delta x_i = x - x_i \text{ или } \Delta x_i = \bar{x} - x_i. \quad (*)$$

Здесь $\bar{x}$ – среднее арифметическое значение измеряемой величины, x – ее истинное значение.

Так как обычно x неизвестно, то для определения погрешности служит формула (*).

Б.1.3. Относительная погрешность

$$\Delta x = \frac{\Delta x_i}{x} \text{ или } \Delta x = \frac{\Delta x_i}{\bar{x}}.$$

Б.1.4. Средняя квадратичная погрешность единичного результата при n измерениях:

$$S_n = \sqrt{\frac{(\bar{x} - x_1)^2 + (\bar{x} - x_2)^2 + \ldots + (\bar{x} - x_n)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}}.$$

Б.1.5. Выборочная дисперсия

$$S_{\text{п}}^2 = \frac{\sum(\overline{x} - x_{\text{п}})^2}{n-1}.$$

Б.1.6. Генеральная дисперсия

$$\sigma^2 = \lim_{\text{п}\to\infty} S_{\text{п}}^2.$$

Б.1.7. Коэффициент вариации:

$$w = \frac{\sigma}{\overline{x}} 100\% \text{ (для генеральной совокупности),}$$

$$w_{\text{п}} = \frac{s_{\text{п}}}{\overline{x}} 100\% \text{ (для выборочной совокупности).}$$

Б.1.8. Среднеарифметическая погрешность (выборочная)

$$r_{\text{п}} = \frac{\sum_{1}^{\text{п}} |\overline{x} - x_{\text{i}}|}{n}.$$

Б.1.9. Генеральная среднеарифметическая погрешность

$$\rho = \lim_{\text{п}\to\infty} r_{\text{п}}.$$

Б.1.10. Связь между среднеарифметической и среднеквадратичной погрешностями:

$$\rho = 0{,}80\sigma; \qquad \sigma = 1{,}25\rho.$$

Б.1.11. Доверительная вероятность для интервалов $\Delta x = k\sigma$

Δx	σ	$2\cdot\sigma$	$3\cdot\sigma$
α	0,68	0,95	0,997

Б.1.12. Ошибка среднего арифметического

$$S_{n\bar{x}} = \frac{S_n}{\sqrt{n}}.$$

Б.1.13. Коэффициент Стьюдента

$$t_{\alpha,n} = \frac{\sqrt{n}}{S_n}\Delta x.$$

Б.1.14. Доверительные вероятности α для доверительного интервала, выраженного в долях средней квадратичной ошибки $\varepsilon = \frac{\Delta x}{\sigma}$

Функция Лапласа: $$2\theta(\varepsilon) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}}\int_0^{\varepsilon} e^{-\frac{\varepsilon^2}{2}} d\varepsilon = \alpha$$

ε	α		ε	α		ε	α
0	0		1,2	0,77		2,6	0,990
0,05	0,04		1,3	0,80		2,7	0,993
0,1	0,08		1,4	0,84		2,8	0,995
0,15	0,12		1,5	0,87		2,9	0,996
0,2	0,16		1,6	0,89		3,0	0,997
0,3	0,24		1,7	0,91		3,1	0,9981
0,4	0,31		1,8	0,93		3,2	0,9986
0,5	0,38		1,9	0,94		3,3	0,9390
0,6	0,45		2,0	0,95		3,4	0,9993
0,7	0,51		2,1	0,964		3,5	0,9995
0,8	0,57		2,2	0,972		3,6	0,9997
0,9	0,63		2,3	0,978		3,7	0,9998
1,0	0,68		2,4	0,984		3,8	0,99986
1,1	0,73		2,5	0,988		3,9	0,99990
						4,0	0,99993

Б.1.15. Коэффициенты Стьюдента $t_{\alpha,n}$

n	α								
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999
2	1,00	1,38	2,0	3,1	6,3	12,7	31,8	63,7	636,6
3	0,82	1,06	1,3	1,9	2,9	4,3	7,0	9,9	31,6
4	0,77	0,98	1,3	1,6	2,4	3,2	4,5	5,8	12,9
5	0,74	0,94	1,2	1,5	2,1	2,8	3,7	4.6	8,6
6	0,73	0,92	1,2	1,5	2,0	2,6	3,4	4.0	6,9
7	0,72	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,1	3,7	6,0
8	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,0	3.5	5,4
9	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,3	2,9	3,4	5,0
10	0,70	0,88	1,1	1,4	1,8	2,3	2,8	3,3	4,8
11	0,70	0,88	1,1	1,4	1,8	2,2	2,8	3.2	4,6
12	0,70	0,87	1,1	1,4	1,8	2,2	2,7	3,1	4,5
13	0,70	0,87	1,1	1,4	1,8	2,2	2,7	3,1	4,3
14	0,69	0,87	1.1	1,4	1.8	2.2	2,7	3,0	4.2
15	0.69	0.87	1.1	1,3	1.8	2,1	2,6	3.0	4.1
16	0,69	0.87	1,1	1,3	1,8	2.1	2.6	2.9	4,0
17	0,69	0,86	1,1	1.3	1.7	2,1	2.6	2.9	4,0
18	0.69	0.86	1.1	1,3	1,7	2.1	2,6	2.9	4,0
19	0.69	0.86	1.1	1,3	1,7	2,1	2,6	2,9	3,9
20	0.69	0.86	1.1	1,3	1.7	2.1	2.5	2,9	3,9
21	0.69	0.86	1.1	1.3	1,7	2,1	2,5	2.8	3,8
22	0,69	0,86	1.1	1,3	1,7	2,1	2,5	2.8	3,8
23	0,69	0,86	1.1	1,3	1,7	2.1	2,5	2,8	3.8
24	0.69	0.86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	2,8	3.8
25	0.69	0.86	1.1	1.3	1.7	2.1	2,5	2.8	3,7
∞	0,67	0.84	1,0	1,3	1,6	2,0	2,3	2,6	3,3

Б.1.16. Необходимое число измерений для получения случайной ошибки ε с надежностью α

$\varepsilon = \frac{\Delta x}{S}$	α					
	0,5	0,7	0,9	0,95	0,99	0,999
1,0	2	3	5	7	11	17
0,5	3	6	13	18	31	50
0,4	4	8	19	27	46	74
0,3	6	13	32	46	78	127
0,2	13	29	70	99	171	277
0,1	47	169	273	387	668	1089
0,05	183	431	1084	1540	2659	4338
0,01	4543	10732	27161	38416	66358	108307

Б.1.17. Оценка выскакивающих измерений.

Вероятность β появления значений $v_{макс} = \left|\frac{\bar{x} - x_k}{S}\right|$ в ряду из n измерений

n	β			
	0,1	0,05	0,025	0,01
3	1,41	1,41	1,41	1,41
4	1,65	1,69	1,71	1,72
5	1,79	1,87	1,92	1,96
6	1,89	2,00	2,07	2,13
7	1,97	2,09	2,18	2,27
8	2,04	2,17	2,27	2,37
9	2,10	2,24	2,35	2,46
10	2,15	2,29	2,41	2,54
11	2,19	2,34	2,47	2,61
12	2,23	2,39	2,52	2,66
13	2,26	2,43	2,56	2,71
14	2,30	2,46	2,60	2,76
15	2,33	2,49	2,64	2,80
16	2,35	2,52	2,67	2,84
17	2,38	2,55	2,70	2,87
18	2,40	2,58	2,73	2,90
19	2,43	2,60	2,75	2,93
20	2,45	2,62	2,78	2,96
21	2,47	2,64	2,80	2,98
22	2,49	2,66	2,82	3,01
23	2,50	2,68	2,84	3,03
24	2,52	2,70	2,86	3,05
25	2,54	2,72	2,88	3,07

Б.2. Рекомендуемый порядок действий при обработке результатов прямых измерений износа и дилатации трибосистем:

Б.2.1. Результаты каждого измерения записываются в таблицу.

Б.2.2. Вычисляется среднее значение из n измерений

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}.$$

Б.2.3. Находятся погрешности отдельных измерений

$$\Delta x_i = \bar{x} - x_i.$$

Б.2.4. Вычисляются квадраты погрешностей отдельных измерений $(\Delta x_i)^2$.

Б.2.5. Если одно или несколько измерений отличаются по своему значению от остальных, то следует проверить, не являются ли они промахом.

Для оценки вероятности β случайного появления выскакивающих значений в ряду *n* измерений (для числа измерений менее 25) могут быть использованы данные, представленные в разделе Б.1.17. При числе измерений, большем 25, можно для расчетов такого рода положить S = σ , и оценку β осуществлять, пользуясь соотношением

$$\beta \approx (1-\alpha)^n.$$

Здесь α – доверительная вероятность, определяемая для нормального распределения (берется из таблицы раздела Б.1.14).

Для практического использования таблицы раздела 1.17 вычисляют среднее арифметическое $\bar{x}$ и среднюю квадратичную погрешность S_n из всех измерений, включая подозреваемое x_k, которое недопустимо велико или мало.

Определяют относительное уклонение этого измерения от среднего арифметического, выраженное в долях средней квадратичной ошибки

$$v_{\text{макс}} = \left| \frac{\bar{x} - x_k}{S_n} \right|.$$

По таблице раздела Б.1.17 находят, какой вероятности β соответствует полученное значение $v_{\text{макс}}$. Предварительно следует установить, при каких значениях контролируемые измерения будут отбрасываться.

Таблица раздела Б.1.17 составлена так, что наименьшее помещенное в ней значение β равно 0,01. Оставлять измерения, вероятность появления которых меньше этой величины, обычно нецелесообразно.

Если вероятность появления данного измерения лежит в промежутке 0,1>β>0,01, то представляется одинаково правильным — оставить это измерение или отбросить. В тех случаях, когда β выходит за указанные пределы, вопрос об отбрасывании, по-видимому, решается однозначно.

Т. е. экспериментальные данные, для которых $\beta > 0{,}1$, следует оставить. Данные, для которых $\beta < 0{,}01$, следует считать грубыми погрешностями эксперимента и должны быть отброшены.

Для примера отметим, что если для некоторого экспериментального результата было получено значение $\beta \approx 0{,}025$, то отбрасывая это измерение мы можем утверждать с вероятностью 0,975, что поступаем правильно, т. е. оно действительно является грубой погрешностью опыта.

Б.2.6. Определяется средняя квадратичная погрешность результата серии измерений

$$\Delta S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\Delta x_i)^2}{n(n-1)}}.$$

Б.2.7. Задается значение надежности α.

Б.2.8. Определяется коэффициент Стьюдента $t_{\alpha,n}$ для заданной надежности α и числа произведенных измерений n (по таблице раздела Б.1.15).

Б.2.9. Находятся границы доверительного интервала (погрешность результата измерений)

$$\Delta x = t_{\alpha,n}\, \Delta S_{\bar{x}}.$$

Б.2.10. Если величина погрешности результата измерений окажется сравнимой с величиной погрешности использованного в экспериментах прибора, то в качестве границы доверительного интервала следует взять величину

$$\Delta x = \sqrt{t_{\alpha,n}^2 \Delta S_{\bar{x}}^2 + \left(\frac{k_\alpha}{3}\right)^2 \delta^2}, \quad k_\alpha \equiv t_\alpha(\infty)$$

где δ – величина погрешности прибора.

Б.2.11. Окончательный результат записывается в виде

$$x = \bar{x} \pm \Delta x.$$

Следует отметить, что данная форма представления результатов

эксперимента справедлива лишь в случае нормального распределения измеренных величин. В том случае, если статистическая обработка показала, что совокупность экспериментальных данных не подчиняется закону Гаусса, то результат измерения должен представляться в виде набора величин: $x = \bar{x}, S_{\bar{x}}, n$.

Б.2.12. Оценивается относительная погрешность результата серии измерений

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{\bar{x}} 100\%.$$

Здесь

$$\Delta x = t_{\alpha,n} \Delta S_{\bar{x}}, \quad \Delta S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n} (\bar{x} - x_i)^2}.$$

Порядок действий при обработке результатов трибодилатометрических экспериментов с использованием персональных компьютеров определяется видом используемого программного продукта. Хорошо зарекомендовали себя пакеты статистических программ **STATISTICA®** в среде **WINDOWS®**. Для ознакомления с возможностями и изучения новой версии этого пакета адресуем читателя к книге Боровиков В. П., Боровиков И. П. STATISTICA® — Статистический анализ и обработка данных в среде WINDOWS®. — М.: Информационно-издательский дом «Филинъ», 1998. — 608 с.

При составлении Приложения Б использованы следующие литературные источники:

1. *Зайдель А. Н.* Элементарные оценки ошибок измерений. — Л.: Наука, 1967. — 88 с.

2. *Кассандрова О. Н., Лебедев В. В.* Обработка результатов наблюдений. — М.: Наука, 1970. — 104 с.

3. *Новицкий П. В., Зограф И. А.* Оценка погрешностей результатов измерений. — Л.: Энергоатомиздат, 1985. — 248 с.

4. *Рего К. Г.* Метрологическая обработка результатов технических измерений: Справ. пособие. — К.: Техніка, 1987. — 128 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lubrication (Tribology) Education and Research (Jost Report) Department of Education. – HMSO: London, 1966. – P. 4.
2. *Джост П.* Прошлое и будущее трибологии // Трение и износ. – 1990. – 11, № 1. – С. 149–159.
3. *Джост П.* Мировые достижения в области трибологии // Трение и износ. – 1986. – 7, № 4. – С. 593–603.
4. *Ишлинский А. Ю., Белый В. А.* Развитие науки о трении и износе в СССР // Трение и износ. – 1980. – 1, № 1. – С. 7–11.
5. *Авдуевский В. С., Броновец М. А.* Трибология и машиностроение // Трение и износ. – 1990. – 11, № 1. – С. 7–19.
6. *Свиридёнок А. И.* Развитие трибологии в Беларуси // Трение и износ. – 1995. – 16, № 3. – С. 397–403.
7. *Свиридёнок А. И.* Тенденция развития трибологии в странах бывшего СССР (1990–1997) // Трение и износ. – 1998. – 19, № 1. – С. 5–16.
8. *Bartz W. J.* Tribologically caused energy lossed // Tribologia. – 1988. – 7, № 4. – P. 2–27.
9. *Янецки Я.* Развитие и актуальные проблемы трибологии в Польше // Трение и износ. – 1981. – 2, № 4. – С. 747–751.
10. *Су Н. П., Яханмир С.* Перспективы трибологических исследований // Трибология: Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ. – М.: Машиностроение; Нью-Йорк: Аллертон пресс, 1993. – С. 14–18.
11. *Jost P. H.* Modern Tribology. Past and Future // Friction – Wear – Lubrication – Design. Theory and practice of tribology: Proc. 6th Int. Congress on Tribology. EUROTRIB'93. Budapest–Hungary, 1993. – V. 6. – P. 1–36.
12. *Белый В. А., Свиридёнок А. И.* Актуальные направления развития исследований в области трения и изнашивания // Трение и износ. – 1987. – 8, № 1. – С. 5–24.
13. Диагностика изнашивания смазанных подвижных сопряжений / *Н. К. Мышкин, О. В. Холодилов, Л. В. Маркова* и др. // Трение и износ. – 1986. – 7, № 6. – С. 1091–1101.
14. *Ясь Д. С., Подмоков В. Б., Дяденко Н. С.* Испытания на трение и износ. Методы и оборудование. – Киев: Техника, 1971. – 140 с.
15. Справочник по триботехнике. Т. 3. Триботехника антифрикционных, фрикционных и сцепных устройств. Методы и средства триботехнических испытаний / Ред. *М. Хебда, А. В. Чичинадзе.* – М.: Машиностроение, 1992. – 730 с.
16. *Гриб В. В., Лазарев Г. Е.* Лабораторные испытания материалов на трение и износ. – М.: Наука, 1968. – 141 с.
17. *Комбалов В. С.* Оценка триботехнических свойств контактирующих поверхностей. – М.: Наука, 1983. – 136 с.
18. *Пружанский Л. Ю., Натчук А. И.* Методика испытаний композиционных антифрикционных материалов на изнашивание при трении по стали в отсутствие смазки. Износостойкость. – М.: Наука, 1975. – С. 155–169.
19. *Холодилов О. В.* Диагностика изнашивания подвижных сопряжений // Три-

бология: Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ. – М.: Машиностроение; Нью-Йорк: Аллертон пресс, 1993. – С. 413–423.
20. Акустические и электрические методы в триботехнике / *А. И. Свиридёнок, Н. К. Мышкин, Т. Ф. Калмыкова, О. В. Холодилов.* – Мн.: Наука и техника, 1987. – 280 с.
21. Справочник по триботехнике / Под общ. ред. *М. Хебды, А. В. Чичинадзе*: В 3 т. – Т. 1: Теоретические основы. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.
22. *Armbruster M.* Frottement, usure: aspects economiques // Ann. Chim. – 1986. – 11, № 3. – S. 213–222.
23. *Демкин Н. Б.* Фактическая площадь касания твердых поверхностей. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 113 с.
24. *Крагельский И. В.* Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
25. *Горячева И. Г., Добычин М. Н.* Контактные задачи в трибологии. – М.: Машиностроение, 1988. – 256 с.
26. *Свиридёнок А. И., Чижик С. А., Петроковец М. И.* Механика дискретного фрикционного контакта. – Мн.: Наука и техника, 1990. – 272 с.
27. *Демкин Н. Б., Рыжов Э. В.* Качество поверхности и контакт деталей машин. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.
28. *Сулима А. М., Шулов В. А., Ягодкин Ю. Д.* Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
29. *Демкин Н. Б.* Теория контакта реальных поверхностей и трибология // Трение и износ. – 1995. – 6, № 6. – С. 1003–1025.
30. *Костецкий Б. И., Колесниченко Н. Ф.* Качество поверхности и трение в машинах. – Киев: Техника, 1969. – 216 с.
31. *Буше Н. А., Копытько В. В.* Совместимость трущихся поверхностей. – М.: Наука, 1981. – 127 с.
32. Проблемы изнашивания твердых тел в аспекте механики / *А. Ю. Ишлинский, И. В. Крагельский, Н. М. Алексеев* и др. // Трение и износ. – 1986. – 7, № 4. – С. 581–592.
33. *Алексеев Н. М., Буше Н. А.* Некоторые аспекты совместимости материалов при трении. 1. Подповерхностные процессы // Трение и износ. – 1985. – 6, № 5. – С. 773–783.
34. *Алексеев Н. М., Буше Н. А.* Некоторые аспекты совместимости материалов при трении. 2. Поверхностные процессы // Трение и износ. – 1985. – 6, № 6. – С. 965–974.
35. О самоподобии процессов трения и изнашивания на различных масштабных уровнях / *Н. М. Алексеев, Н. Н. Кузьмин, Г. Р. Транковская* и др. // Трение и износ. – 1992. – 13, № 1. – С. 161–171.
36. *Джонсон К. Л.* Пластическое течение поверхностей при циклическом качении и скольжении // Трение и износ. – 1992. – 13, № 1. – С. 15–20.
37. Поверхностная прочность материалов при трении / *Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский, А. К. Караулов* и др. – Киев: Техника, 1976. – 296 с.
38. *Костецкий Б. И.* Трение, смазка и износ в машинах. – Киев: Техника, 1970. – 396 с.
39. *Бершадский Л. И.* О взаимосвязи структурных механизмов и диссипативных потоков при кинетическом (некулоновском) трении и износе // Трение и износ. – 1989. – 10, № 2. – С. 358–364.
40. *Бершадский Л. И.* О самоорганизации и концепциях износостойкости три-

босистем // Трение и износ. – 1992. – 13, № 6. – С. 1077–1094.
41. *Костецкий Б. И.* Структурно-энергетическая приспосабливаемость материалов при трении // Трение и износ. – 1985. – 6, № 2. – С. 201–212.
42. *Гольдаде В. А., Пинчук Л. С.* Электретные пластмассы: Физика и материаловедение. – Мн.: Наука и техника, 1987. – 231 с.
43. *Климович А. Ф., Миронов В. С.* Электрические явления при трении полимеров. 1. Некоторые закономерности и роль процессов электризации // Трение и износ. – 1985. – 6, № 5. – С. 796–806.
44. *Миронов В. С., Климович А. Ф.* Электрические явления при трении полимеров. 2. Кинетика электризации // Трение и износ. – 1985. – 6, № 6. – С. 1026–1033.
45. *Mróz W.* Mechanizm generowania pradu triboelektrycznego w wezlach slizgowych // Lag. Eksploat. Masz. – 1984. – 19, № 3–4. – S. 307–318.
46. *Katafuchi T., Takano N.* Электрические явления между трущимися поверхностями. Ч. 1. Вольтамперная характеристика // Дзюнкацу (J. Jap. Soc. Lubric. Eng.). – 1980. – 25, № 6. – P. 395–399.
47. *Katafuchi T., Takano N.* Электрические явления между трущимися поверхностями. Ч. 2. Влияние вязкости и глубины очистки масла // Дзюнкацу (J. Jap. Soc. Lubric. Eng.). – 1980. – 25, № 6. – P. 400–404.
48. *Владыкина Т. Н., Топоров Ю. П., Лучников А. П.* Взаимосвязь процессов электризации и переноса материала при трении диэлектриков // Трение и износ. – 1988. – 9, № 3. – С. 534–538.
49. *Берлин Ю. А., Бешенко С. И., Жорин В. А., Ениколопян Н. С.* Перенос электронов при пластическом течении под давлением в металлах и металлополимерных композитах // Докл. АН СССР. – 1986. – 287, № 5. – С. 1154–1156.
50. *Семенов А. П.* Исследование схватывания металлов при совместном пластическом деформировании. – М.: Изд-во АН СССР, 1953. – 120 с.
51. *Мышкин Н. К., Белый А. В., Холодилов О. В.* Оценка размеров фрагментов массопереноса // Трение и износ. – 1981. – 2, № 2. – С. 372–375.
52. *Погосян А. К.* Эллипсометрия как метод исследования фрикционного переноса // Трение и износ. – 1980. – 1, № 4. – С. 736–741.
53. Исследование поведения в процессе трения полимерного материала на основе олигомер – полимерной системы фенолфталеинфенолоформальдегидный олигомер – полинафтоиленбензимидазол / *В. В. Коршак, И. А. Грибова, О. В. Виноградова* и др. // Трение и износ. – 1986. – 7, № 3. – С. 389–397.
54. *Савкин В. Г., Смуругов В. А.* Адгезия и перенос материала при трении полимеров // Трение и износ. – 1983. – 4, № 1. – С. 34–39.
55. *Белякова Г. В., Иноземцев В. И., Коханов Б. Ф.* О некоторых особенностях образования и разрушения пленок переноса поликапроамида // Трение и износ. – 1986. – 7, № 1. – С. 108–113.
56. *Larsen-Basse J.* Binder extrusion in sliding wear of WC – Co alloys // Wear. – 1985. – 105, № 3. – P. 247–256.
57. *Karpe S. A., Saka N.* High-load and low-speed sliding behavior of marginally lubricated metal surface // ASLE Prepr. ASME/ ASLE Lubr. Conf. San-Diego Calif., 22–24 Oct., 1984. Techn. Prepr. Park Ridge, ill, s.a. 3A.2/1–3A.2/7.
58. *Don J., Rigney D. A.* Prediction of debris flake thickness // Wear. – 1985. – 105, № 1. – P. 63–72.

59. *Погосян А. К., Оганесян К. В.* Явление фрикционного переноса: основные закономерности и методы исследования // Трение и износ. – 1986. – 7, № 6. – С. 998–1007.
60. Исследование механизма трения медно-фторопластового композита / *А. А. Кутьков, В. О. Гречко, А. С. Кужаров* и др. // Трение и износ. – 1980. – 1, № 6. – С. 993–999.
61. *Свиридёнок А. И.* Роль фрикционного переноса в механизме самосмазывания композиционных материалов // Трение и износ. – 1987. – 8, № 5. – С. 773–778.
62. Особенности переноса вещества в тяжелонагруженных парах трения и способы управления им / *Д. Г. Громаковский, Л. М. Рыбакова, Л. И. Куксенова* и др. // Трение и износ. – 1983. – 4, № 2. – С. 202–210.
63. Избирательный перенос в тяжелонагруженных узлах трения / Под общ. ред. *Д. Н. Гаркунова.* – М.: Машиностроение, 1982. – 207 с.
64. Повышение износостойкости на основе избирательного переноса / Под общ. ред. *Д. Н. Гаркунова.* – М.: Машиностроение, 1977. – 215 с.
65. *Гаркунов Д. Н., Поляков А. А.* Повышение износостойкости деталей конструкций самолетов. – М.: Машиностроение, 1973. – 200 с.
66. *Шпеньков Г. П.* Физикохимия трения. – Мн.: Университетское, 1991. – 397 с.
67. *Литвинов В. Н., Михин Н. М., Мышкин Н. К.* Физико-химическая механика избирательного переноса. – М.: Наука, 1979. – 187 с.
68. *Гаркунов Д. Н.* Триботехника. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.
69. *Польцер Г., Майсснер Ф.* Основы трения и изнашивания. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
70. *Дерягин Б. В.* Что такое трение. Очерки о природе трения. – М.: Изд-во АН СССР, 1952. – 244 с.
71. *Хайнике Г.* Трибохимия / Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 584 с.
72. Трение, изнашивание и смазка: Справочник: В 2 кн.: Кн. 1. / Под ред. *И. В. Крагельского, В. В. Алисина.* – М.: Машиностроение, 1978. – 400 с.
73. *Belyi V. A., Sviridyonok A. I., Smurugov V. A.* Molecular changes in surface layers of polymer materials during rubbing // EUROTRIB'77. Eur. Tribol. Kongr., Dusseldorf, 1977, bd. 2–3. – s.a. – 4/ 1–4/ 4.
74. *Sviridyonok A. I., Belyi V. A., Smurugov V. A., Savkin V. G.* A study of transfer in frictional interaction of polymers // Wear. – 1973. – 25, № 3. – P. 301–308.
75. *Гороховский Г. А.* Полимеры в технологии обработки металлов. – Киев: Наук. думка, 1975. – 224 с.
76. *Колесников В. И.* Теплофизические и адгезионные процессы в металлополимерных трибосистемах // Трение и износ. – 1998. – 19, № 6. – С. 745–750.
77. *Краснов А. П., Грибова И. А., Чумаевская А. Н.* Химическое строение полимеров и трибохимические превращения в полимерах и наполненных системах // Трение и износ. – 1997. – 18, № 2. – С. 258–279.
78. *Крагельский И. В., Зеленская М. Н.* Трибохимические процессы в наполненных и не наполненных покрытиях из высокомолекулярной эпоксидной смолы // Трение и износ. – 1987. – 8, № 6. – С. 965–972.
79. *Аксенов А. Ф., Шепель А. Я.* К вопросу прогнозирования и увеличения ресурса работы узлов трения топливных агрегатов // Трение и износ. – 1987. – 8, № 6. – С. 1018–1025.

80. *Clark D. B., Klaus E. E.* The role of iron and copper in the oxidation degradation of lubricating oils // Lubr. Eng. – 1985. – 41, № 5. – P. 280–287.
81. *Аксенов А. Ф., Назаренко П. В., Макаркин А. Н.* Исследование влияния водорода на упругопластические деформации и характеристики внешнего трения титанового сплава ВТ3-1 // Трение и износ. – 1982. – 3, № 1. – С. 13–17.
82. *Плескачевский Ю. М.* Физико-химические процессы и адгезия при трении // Трибология: Исследования и приложения: Опыт США и стран СНГ. – М.: Машиностроение; Нью-Йорк; Аллертон пресс, 1993. – С. 98–111.
83. *Егоренков Н. И., Родненков В. Г., Белый В. А.* Исследование химических изменений полимера при скольжении по металлу // Физико-химическая механика материалов. – 1973, № 3. – С. 42–45.
84. *Белый В. А., Егоренков Н. И., Плескачевский Ю. М.* Адгезия полимеров к металлам. – Минск: Наука и техника, 1971. – 288 с.
85. Трение, изнашивание и смазка: Справочник: В 2-х кн.: Кн. 2. / Под ред. *И. В. Крагельского, В. В. Алисина.* – М.: Машиностроение, 1979. – 358 с.
86. *Буданов Б. В., Кудинов В. А., Толстой Д. М.* Взаимосвязь трения и колебаний // Трение и износ. – 1980. – 1, № 1. – С. 79–89.
87. *Марюта А. Н.* Фрикционные колебания в механических системах. – М.: Недра, 1993. – 240 с.
88. *Геккер Ф. Р.* Динамика машин, работающих без смазочных материалов в узлах трения. – М.: Машиностроение, 1983. – 280 с.
89. *Ишлинский А. Ю., Крагельский И. В.* О скачках при трении // ЖТФ. – 1944. – 14; Вып. 4–5. – С. 276–283.
90. *Lenkiewicz W.* The sliding friction process-effect of external vibrations // Wear. – 1969. – 13, № 2. – P. 99–108.
91. *Левински А., Пытко С.* Изменения коэффициента трения и износа в условиях вынужденных колебаний // Трение и износ. – 1994. – 15, № 2. – С. 202–209.
92. *Назаренко А. Ф., Топилин Е. Г.* Исследование влияния механических колебаний на процесс трения // Трение и износ. – 1994. – 15, № 4. – С. 590–598.
93. *Satoshi K., Eisuke T., Fumihiko N.* Self-Excited Vibrations with Solid Friction of Nonconstant-Speed Sliding System // Jap. Soc. Mech. Eng. C. Trans. – 1993. – 59, № 563. – С. 1999–2006.
94. *Курапов П. А., Ивлев В. И.* Исследование влияния состояния и свойств контакта на частотные характеристики пар трения // Трение и износ. – 1980. – 1, № 6. – С. 1045–1049.
95. *Геккер Ф. Р.* Обобщенная динамическая модель узлов «сухого» трения // Трение и износ. – 1998. – 19, № 2. – С. 165–170.
96. *Геккер Ф. Р., Хайралиев С. И.* Об устойчивости скольжения тела по движущемуся основанию // Трение и износ. – 1992. – 13, № 4. – С. 581–587.
97. *Свиридёнок А. И., Можис Д., Баркен М., Смуругов В. А.* О низкочастотных колебаниях при трении полимеров и расслаивании адгезионных соединений // Трение и износ. – 1991. – 12, № 5. – С. 795–800.
98. *Крагельский И. В., Щедров В. С.* Развитие науки о трении. – М.: Изд-во АН СССР, 1956. – 236 с.
99. *Адам Н. К.* Физика и химия поверхности. – Москва–Ленинград: Госуд. изд-во техн.-теор. лит-ры, 1947. – 552 с.

100. *Конвисаров Д. В.* Внешнее трение и износ металлов. – Свердловск–Москва: Машгиз, 1947. – 184 с.
101. *Крагельский И. В., Виноградова И. Э.* Коэффициенты трения. – М.: Госуд. науч.-техн. изд-во машиностр. лит-ры, 1955. – 188 с.
102. *Бартенев Г. М., Лаврентьев В. В.* Трение и износ полимеров. – Л.: Химия, 1972. – 240 с.
103. *Белый В. А., Свиридёнок А. И., Петроковец М. И, Савкин В. Г.* Трение и износ материалов на основе полимеров. – Мн.: Наука и техника, 1976. – 432 с.
104. *Кривенко И. И.* Механизм граничной смазки и периодические колебания показателей трения // Трение и износ. – 1994. – 15, № 3. – С. 410–416.
105. *Зазуля В. Д., Шведков Е. Л., Ровинский Д. Я., Браун Э. Д.* Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин. – Киев: Наук. думка, 1990. – 264 с.
106. *Хрущов М. М.* Исследование приработки подшипниковых сплавов и цапф. – М. – Л.: Изд-во АН СССР, 1946. – 146 с.
107. Трибоэлектрохимия эффекта безызносности. Влияние трения на электрохимические характеристики фрикционного контакта в начальной стадии избирательного переноса / *А. С. Кужаров, В. Э. Бурлакова, Р. Марчак* и др. // Трение и износ. – 1998. – 19, № 1. – С. 86–89.
108. *Макаркин А. Н., Назаренко П. В.* Исследование влияния водорода на изменение микроструктуры приповерхностных слоев при внешнем трении // Трение и износ. – 1983. – 4, № 1. – С. 18–25.
109. *Жеглов О. С.* Механизм повреждения контактных поверхностей вкладышей из алюминиевой бронзы и латуней, применяемых в подвижных шарнирах // Трение и износ. – 1981. – 2, № 3. – С. 549–551.
110. *Пинчук Р. Г., Пинчук В. Г., Харитонов В. В.* Взаимосвязь кинетики изнашивания со структурными изменениями на фрикционном контакте // Трение и износ. – 1984. – 5, № 4. – С. 670–676.
111. *Niewczak A.* Die periodische Komponente eines Prozresses des Betriebsverschleisses von tribologischen Systemen // 6 Symp. «Zuverlassigkeit», Magdeburg, 3–5 Sept., 1990: Tagungsmater. – [Magdeburg], [1990]. – S. 41–44.
112. *Wiedemeyer J.* Deutung des tribologischen Verhaltens ungeschmierter Thermoplaste auf der Basis von Modellrechnungen sowie experimentellen Ergebnissen // Fortschr. Ber. VDI Z. – 1985. – R5, № 96. – 255 s.
113. *Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С.* Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
114. *Марченко Е. А.* О закономерностях разрушения фрикционного контакта при тяжелых режимах нагружения // Задачи нестационарного трения в машинах, приборах и аппаратах. – М.: Наука, 1978. – С. 156–166.
115. *Жарин А. Л., Генкин В. А., Роман О. В.* О связи периодических изменений работы выхода электрона трущейся поверхности с усталостным разрушением // Трение и износ. – 1986. – 7, № 2. – С. 330–341.
116. *Жарин А. Л.* Метод контактной разности потенциалов и его применение в трибологии. – Мн.: Бестпринт, 1996. – 240 с.
117. *Пинчук В. Г., Пинчук Р. Г., Харитонов В. В., Шишкин Е. М.* О взаимосвязи изменений структуры поверхностных слоев твердых тел и смазочной среды при трении // Трение и износ. – 1982. – 3, № 2. – С. 335–338.

118. *Поляков А. А.* Самоорганизация структуры избирательного переноса. – В кн.: Долговечность трущихся деталей машин; Вып. 3. – М.: Машиностроение, 1988. – С. 45–88.
119. *Кужаров А. С., Онищук Н. Ю.* Металлоплакирующие смазочные материалы. – В кн.: Долговечность трущихся деталей машин; Вып. 3. – М.: Машиностроение, 1988. – С. 96–143.
120. Трибологические проявления самоорганизации в системе латунь – глицерин – сталь / *А. С. Кужаров, Р. Марчак, Я. Гузик* и др. // Трение и износ. – 1996. – 17, № 1. – С. 113–122.
121. *Валетов В. А.* Изменение микрогеометрии поверхностей трения деталей цилиндропоршневой группы судовых дизелей в процессе их работы // Трение и износ. – 1983. – 4, № 6. – С. 1104–1107.
122. *Балакин В. А., Синюк Н. И.* Измерение температур в поверхностном слое элемента пары трения с помощью микротермопар // Трение и износ. – 1986. – 7, № 5. –С. 931–934.
123. Механизм водородного изнашивания торцовых уплотнений водяных насосов автотракторных двигателей / *Б. А. Мадалинов, С. А. Поляков, Ф. Х. Бурумкулов* и др. // Трение и износ. – 1987. – 8, № 5. – С. 879–887.
124. *Перевознюк В. А.* О магнитометрическом исследовании трения скольжения // Трение и износ. – 1984. – 5, № 1. – С. 170–172.
125. *Буфеев В. А., Буше Н. А.* О влиянии упругих волновых потерь на усталостное разрушение материалов при внешнем трении // Трение и износ. – 1994. – 15, № 3. – С. 504–514.
126. *Бородай А. В.* К вопросу о физической модели фрикционного взаимодействия тел // Трение и износ. – 1991. – 12, № 4. – С. 588–595.
127. *Бородай А. В., Турченюк Т. Г., Статешная Е. С.* О процессе фрикционного взаимодействия тел и сред как замкнутой поперечной волне // Трение и износ. – 1993. – 14, № 3. – С. 498–504.
128. *Крысов С. В., Орлов А. Л.* О взаимосвязи волновых свойств тел и кинетической зависимости сил трения // Трение и износ. – 1991. – 12, № 4. – С. 610–616.
129. *Крысов С. В., Лазарев В. А.* К модели сухого трения Е. Адировича и Д. Блохинцева. Учет вязкоупругих свойств материалов // Трение и износ. – 1992. – 13, № 2. – С. 251–256.
130. *Avitzur B., Eto M., Kay E.* Treating rolling vs. sliding friction by the wave model // Wear. – 1992. – 156, № 2. – P. 211–237.
131. *Suh N. P., Sin H. C.* The genesis of friction // Wear. – 1981. – 69, № 1. – P. 91–114.
132. *Запорожец В. В.* Динамические характеристики прочности поверхностных слоев и их оценка // Трение и износ. – 1980. – 1, № 4. – С. 602–609.
133. *Браун Э. Д., Евдокимов Ю. А., Чичинадзе А. В.* Моделирование трения и изнашивания в машинах. – М.: Машиностроение, 1982. – 191 с.
134. *Евдокимов Ю. А., Колесников В. И., Тетерин А. И.* Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. – М.: Наука, 1980. – 228 с.
135. *Дроздов Ю. Н., Павлов В. Г., Пучков В. Н.* Трение и износ в экстремальных условиях. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
136. *Петроковец М. И., Мышкин Н. К., Чижик С. А.* Некоторые статистические модели фрикционного контакта // Трение и износ. – 1997. – 18, № 2.

– С. 147–154.

137. *Утенков В. М.* Разработка прикладного программного обеспечения для моделирования процесса изменения формы направляющих пар трения скольжения при износе // Трение и износ. – 1998. – 19, № 2. – С. 213–217.
138. *Шаповалов В. В., Григориади К. Ю., Езупова М. Н.* Применение методов физического моделирования для диагностики фрикционных систем // Трение и износ. – 1988. – 9, № 2. – С. 256–265.
139. *Гриб В. В.* Решение триботехнических задач численными методами. – М.: Наука, 1982. – 112 с.
140. *Гриб В. В.* Векторный анализ процесса изнашивания // Трение и износ. – 1983. – 4, № 3. – С. 432–439.
141. *Гриб В. В.* Общий методологический подход к разработке математических моделей изнашивания сопряженных деталей машин // Трение и износ. – 1987. – 8, № 6. – С. 996–1003.
142. *Когаев В. П., Дроздов Ю. Н.* Прочность и износостойкость деталей машин. – М.: Высш. школа, 1991. – 319 с.
143. Моделирование работы пар трения с учетом конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов / *В. В. Корнилов, Ю. П. Замятин, Г. Н. Телегин* и др. // Трение, износ и смазочные материалы: Тез. докл. междунар. науч. конф. 22–26 мая 1985 г., Ташкент. – Т. 1. – Москва, 1985. – С. 382–386.
144. *Рогачев А. В., Буй М. В., Плескачевский Ю. М.* Релаксационная модель трения и изнашивания полимеров в контакте с металлами // Трение и износ. – 1989. – 10, № 4. – С. 716–722.
145. *Карасик И. И., Поляков С. А.* Масштабный фактор и возможности моделирующих испытаний на существующих машинах трения // Трение и износ. – 1983. – 4, № 4. – С. 671–675.
146. *Дроздов Ю. Н.* К разработке методики расчета на изнашивание и моделирование трения // Износостойкость. – М.: Наука, 1975. – С. 120–135.
147. *Захаров С. М.* Прогнозирование показателей износостойкости не стационарно нагруженных опор скольжения силовых установок с помощью метода имитационного моделирования // Трение и износ. – 1982. – 3, № 5. – С. 789–800.
148. *Кеглин Б. Г., Тихомиров В. П., Гольдрин А. Л.* Применение метода статистического моделирования (Монте-Карло) для исследования вероятностных характеристик трибосопряжений // Трение и износ. – 1981. – 2, № 2. – С. 361–365.
149. *Браун Э. Д.* Расчет масштабного фактора при оценке трения и изнашивания // Износостойкость. – М.: Наука, 1975. – С. 136–154.
150. *Скорынин Ю. В., Минченя Н. Т.* Модель изнашивания подшипника качения // Трение и износ. – 1984. – 5, № 2. – С. 266–272.
151. *Кузьмин Н. Н., Фельдштейн И. В.* О некоторых подходах к моделированию трибосистем // Трение и износ. – 1996. – 17, № 3. – С. 320–325.
152. *Войтов В. А., Исаков Д. И.* Моделирование граничного трения в трибосистемах. I. Методика физического моделирования // Трение и износ. – 1996. – 17, № 3. – С. 298–306.
153. *Войтов В. А., Исаков Д. И.* Моделирование граничного трения в трибосистемах. II. Методика математического моделирования стационарных процессов при граничном трении // Трение и износ. – 1996. – 17, № 4.

– С. 456–462.

154. *Войтов В. А., Исаков Д. И.* Моделирование граничного трения в трибосистемах. III. Математическое моделирование нестационарных процессов при граничном трении // Трение и износ. – 1996. – 17, № 5. – С. 598–605.
155. *Rac A.* Prognoziranje velicine habanja // Tribol. u ind. – 1987. – 9, № 4. – S. 101–104.
156. *Zum G. K. H.* Modelling of two-body abrasive wear // Wear. – 1988. – 124, № 1. – P. 87–103.
157. *Годе М.* Моделирование процессов трения и изнашивания // Трение и износ. – 1992. – 13, № 1. – С. 27–42.
158. *Проников А. С.* Макротрибология и ее задачи // Трение и износ. – 1998. – 19, № 2. – С. 155–164.
159. *Van A. J., Granick S.* Molecular tribometry: recent results and future prospects // New Mater. Approaches Tribol.: Theory and Appl.: Symp., Boston, Mass., Nov. 29–Dec. 2, 1988. – Pittsburg (Pa), 1989. – P. 125–130.
160. *Ferrante J., Pepper S. V.* Fundamentals of tribology at the atomic level // New Mater. Approaches Tribol.: Theory and Appl.: Symp., Boston, Mass., Nov. 29–Dec. 2, 1988. – Pittsburg (Pa), 1989. – P. 37–50.
161. *Хрущов М. М.* (мл.) О связи межатомного взаимодействия, атомных свойств и износостойкости металлов // Трение и износ. – 1990. – 11, № 3. – С. 409–415.
162. О самоподобии процессов трения и изнашивания на различных масштабных уровнях / *Н. М. Алексеев, Н. Н. Кузьмин, Г. Р. Транковская* и др. // Трение и износ. – 1992. – 3, № 1. – С. 161–171.
163. *Bhushan B.* Microtribology and its applications to magnetic storage systems // Proc. 6th Int. Congress on Tribology. EUROTRIB'93. Budapest–Hungary, 1993. – V. 1. – P. 65–70.
164. *Белый В. А., Плескачевский Ю. М.* Металлополимерные системы. – М.: Знание, 1982. – 64 с.
165. Триботехнические свойства антифрикционных самосмазывающихся пластмасс: Обзор. Информ. / Госстандарт; ВНИЦ ГСССД; Центр данных ГСССД по триботехническим свойствам материалов и др.; Под ред. *Г. В. Сагалаева, Н. Л. Шембель.* – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 64 с.
166. Материаловедение и конструкционные материалы / *Л. С. Пинчук, В. А. Струк, Н. К. Мышкин, А. И. Свиридёнок.* – Мн.: Высшая школа, 1989. – 461с.
167. Материалы для узлов сухого трения, работающих в вакууме: Справочник / *Н. А. Цеев, В. В. Козелкин, А. А. Гуров.* – М.: Машиностроение, 1991. – 192 с.
168. *Гуляев А. П.* Металловедение. – М.: Металлургия, 1977. – 648 с.
169. *Чичинадзе А. В., Матвеевский Р. М., Браун Э. Д.* Материалы в триботехнике нестационарных процессов. – М.: Наука, 1986. – 248 с.
170. Материалы будущего: Перспективные материалы для народного хозяйства: Пер. с нем. / Под ред. *А. Неймана.* – Л.: Химия, 1985. – 239 с.
171. *Ристич М. М.* Основы науки о материалах / Пер. с сербскохорв. – Киев: Наук. думка, 1984. – 151 с.
172. *Lansdown A. R., Rice A. L.* Materials to resist wear. – Oxford e. a.: Pergamon Press, 1986. – 128 p.
173. *Машков Ю. К.* Трибология конструкционных материалов. – Омск: Изд-во

ОмГТУ. – 1996. – 299 с.
174. *Воронков В. Д.* Подшипники сухого трения. – Л.: Машиностроение, 1979. – 224 с.
175. *Фролов К. В.* Методы совершенствования машин и современные проблемы машиноведения. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.
176. *Пугина Л. И., Синявская М. Д., Максимчук И. М.* Дисульфид молибдена, его свойства и применение. – Киев: Наук. думка, 1968. – 50 с.
177. Graphite fibers and filaments / *M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, K. Sigihara, I. L. Spain, H. A. Goldberg.* – Berlin ets: Springer, 1988. – 382 s.
178. Наполнители для полимерных композиционных материалов / Пер. с англ. / Под ред. *П. Г. Бабаевского.* – М.: Химия, 1981. – 736 с.
179. *Гольдаде В. А., Струк В. А., Песецкий С. С.* Ингибиторы изнашивания металлополимерных материалов. – М.: Химия, 1993. – 240 с.
180. *Погосян А. К.* Основные принципы подбора наполнителей для композиционных самосмазывающихся полимерных материалов // Трение, износ и смазочные материалы. – Т. 2. – М., 1985. – С. 232–236.
181. *Гольцев В. П., Данилькевич М. И.* Прочностные характеристики кристаллических веществ и их связь с энергией решетки и износостойкостью // Трение и износ. – 1983. – 4, № 3. – С. 415–419.
182. *Айнбиндер С. Б.* Антифрикционные свойства композиций на основе полимерных материалов, наполненных относительно твердыми наполнителями // Трение и износ. – 1982. – 3, № 4. – С. 610–620.
183. *Охлопкова А. А., Устыч Ю. Н.* Влияние оксидов некоторых металлов на свойства политетрафторэтилена // Трение и износ. – 1996. – 17, № 2. – С. 218–220.
184. *Савкин В. Г.* Об учете молекулярного взаимодействия при создании самосмазывающихся композитов на основе полимеров // Трение и износ. – 1984. – 5, № 1. – С. 5–9.
185. *Колесников В. И., Волков А. В., Мясникова Н. А.* Влияние адгезионного взаимодействия на границе раздела компонент на физико-механические характеристики композита // Трение и износ. – 1995. – 16, № 2. – С. 309–314.
186. *Липатов Ю. С.* Физико-химические основы наполнения полимеров. – М.: Химия, 1991. – 261 с.
187. Исследование природы армирующего наполнителя на фрикционные свойства и структуру поверхности трения углерод-углеродных композитов / *А. М. Кенигфест, В. В. Кулаков, З. В. Игнатьева* и др. // Трение и износ. – 1994. – 15, № 5. – С. 800–810.
188. *Липатов Ю. С.* Межфазные явления в полимерах. – Киев: Наук. думка, 1980. – 260 с.
189. Металлополимерные материалы и изделия. – М.: Химия, 1979. – 312 с.
190. *Камерон А.* Теория смазки в инженерном деле. – М.: Госуд. науч.-техн. издво машиностр. лит-ры, 1962. – 296 с.
191. *Проников А. С.* Надежность машин. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.
192. *Буше Н. А.* Подшипниковые сплавы для подвижного состава. – М.: Транспорт, 1967. – 224 с.
193. Подшипники из алюминиевых сплавов / *Н. А. Буше, А. С. Гуляев, В. А. Двоскина, К. М. Раков.* – М.: Транспорт, 1974. – 256 с.

194. Износостойкие композиты на основе реактопластов / *П. В. Сысоев, М. М. Близнец, А. Л. Зайцев* и др. – Мн.: Наука и техника, 1987. – 192 с.
195. *Крыжановский В. К.* Износостойкие реактопласты. – Л.: Химия, 1984. – 120 с.
196. Антифрикционные эпоксидные композиты в станкостроении / *П. В. Сысоев, М. М. Близнец, А. К. Погосян* и др. – Мн.: Наука и техника, 1990. – 231с.
197. *Евдокимов Ю. А., Барсуков Р. Х.* Новые антифрикционные полимерные композиции на базе эпоксидных смол. – Ростов-на-Дону: Кн. изд-во,1976. – 80 с.
198. *Купчинов Б. И., Родненков В. Г., Ермаков С. Ф.* Введение в трибологию жидких кристаллов. – Гомель: ИММС АНБ, «Информтрибо». – 1993. – 156 с.
199. *Белый В. А., Врублевская В. И., Купчинов Б. И.* Древесно-полимерные конструкционные материалы и изделия. – Мн.: Наука и техника, 1980. – 280 с.
200. *Белый В. А., Пинчук Л. С.* Введение в материаловедение герметизирующих систем. – Мн.: Наука и техника, 1980. – 304 с.
201. *Плескачевский Ю. М., Смирнов В. В., Макаренко В. М.* Введение в радиационное модифицирование полимерных композитов. – Минск: Наука и техника, 1991. – 191 с.
202. Кутьков А. А. Износостойкие и антифрикционные покрытия. – М.: Машиностроение, 1976. – 152 с.
203. *Заславский Ю. С.* Трибология смазочных материалов. – М.: Химия, 1991. –240 с.
204. *Заславский Ю. С., Заславский Р. Н.* Механизм действия противоизносных присадок к маслам. – М.: Химия, 1978. – 224 с.
205. *Фукс Г. И.* Добавки к пластичным смазкам. – М.: Химия, 1982. – 248 с.
206. Смазочные материалы: Антифрикционные и противозадирные свойства. Методы испытаний: Справочник / *Р. М. Матвеевский, В. Л. Лашхи, И. А. Буяновский* и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 224 с.
207. *Кулиев А. М.* Химия и технология присадок к маслам и топливам. – 2-е изд., доп. – Л.: Химия, 1985. – 312 с.
208. *Пратт Дж. С.* Подшипниковые сплавы для двигателей внутреннего сгорания // Трибология: Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ. – М.: Машиностроение; Нью-Йорк: Аллертон пресс, 1993. – С. 312–330.
209. *Радин Ю. А., Суслов П. Г.* Безызносность деталей машин при трении. – Л.: Машиностроение, 1989. – 229 с.
210. *Кламанн Д.* Смазки и родственные продукты. Синтез. Свойства. Применение. Международные стандарты: Пер. с англ. / Под ред. *Ю. С. Заславского.* – М.: Химия, 1988. – 488 с.
211. *Кончиц В. В., Мешков В. В., Мышкин Н. К.* Триботехника электрических контактов. – Мн.: Наука и техника, 1986. – 256 с.
212. *Семенов А. П., Савинский Ю. Э.* Металлофторопластовые подшипники. – М.: Машиностроение, 1976. – 192 с.
213. Разъемные соединения с фторопластовыми уплотнениями: Справочник / *В. Д. Продан, И. Г. Калабеков, Г. В. Божко* и др. – М.: Тривола, 1995. – 180 с.

214. *Авдеев Д. Т., Бабец Н. В., Мусиенко С. С.* Материалы и конструкции самосмазывающихся подшипников скольжения. – Новочеркасск: Гос. техн. ун-т, 1993. – 112 с.
215. *Свиридёнок А. И.* Трибология полимеров и композитов // Трибология: Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ. – М.: Машиностроение; Нью-Йорк: Аллертон пресс, 1993. – С. 149–175.
216. *Айсс Н. С.* (мл.) Трение и изнашивание полимеров // Трибология: Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ. – М.: Машиностроение; Нью-Йорк: Аллертон пресс, 1993. – С. 176–189.
217. Принципы создания композиционных полимерных материалов / *Ал. Ал. Берлин, С. А. Вольфсон, В. Г. Ошмян, Н. С. Ениколопов.* – М.: Химия, 1990. – 240 с.
218. *Кулезнев В. Н.* Смеси полимеров. – М.: Химия, 1980. – 304 с.
219. *Макушкин А. П.* Полимеры в узлах трения и уплотнениях при низких температурах. – М.: Машиностроение, 1993. – 288 с.
220. *Волынова Т. Ф.* Высокомарганцовистые стали и сплавы. – М.: Металлургия, 1988. – 342 с.
221. *Воинов Б. А.* Износостойкие сплавы и покрытия. – М.: Машиностроение, 1980. – 120 с.
222. *Champagne B., Angers R., Fiset M.* Properties of WC-Co/ steel composites // Int. J. Refract. And Hard Metals. – 1987. – 6, № 3. – S. 155–160.
223. *Tayeh G. S., Woehrie H. R.* Improvements in bearing steel cleanness and the effect on integral wheel bearing systems // SAE Tech. Pap. Ser. – 1987, № 871983. – P. 1–9.
224. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / *В. Н. Анциферов, Г. В. Бобров, Л. К. Дружинин* и др. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
225. *Андриевский Р. А.* Порошковое материаловедение. – М.: Металлургия, 1991. – 204 с.
226. *Анциферов В. Н., Латыпов М. Г., Шацов А. А.* Ферротики с метастабильной матрицей // Трение и износ. – 1996. – 17, № 5. – С. 644–652.
227. *Зозуля В. Д.* Эксплуатационные свойства порошковых подшипников. – Киев: Наук. думка, 1989. – 287 с.
228. *Шебатинов М. П., Абраменко Ю. Е., Бех Н. И.* Высокопрочный чугун в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1988. – 215 с.
229. *Цыпин И. И.* Белые износостойкие чугуны. – М.: Металлургия, 1983. – 175 с.
230. *Медведев М. А., Комаров В. А.* Влияние меди на износостойкость серых чугунов // Трение и износ. – 1980. – 1, № 5. – С. 922–925.
231. *Кочевых С. В., Веселов И. Н., Дерябин А. А.* Влияние структурного состояния поверхностных слоев на трение и изнашивание фосфористых чугунов с компактной формой графита // Трение и износ. – 1989. – 10, № 3. – С. 540–544.
232. Конструкционные материалы: Справочник / *Б. Н. Арзамасов, В. А. Брострем, Н. А. Буше* и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 688 с.
233. *Mazzolani F. M.* Aluminium alloy structures. – Boston e. a.: Pitman Adv. Publ. Program, 1985. – 430 p.
234. *Буше Н. А., Маркова Т. Ф., Берент В. Я.* Оценка характеристик схватывания алюминиевых антифрикционных сплавов // Трение и износ. – 1990. – 11, № 2. – С. 253–258.

235. *Чашечкина Ж. Ю., Орлов Д. Б.* Антифрикционные алюминиево-свинцовые сплавы для подшипников скольжения // Трение и износ. – 1996. – 17, № 6. – С. 802–809.
236. *Pramila B. B. N., Biswas S. K.* Characterization of dry sliding wear of Al–Si alloys // Wear. – 1987. – 120, № 1. – P. 61–74.
237. *Sharma A., Soni P. R., Rajan T. V.* Development and evaluation of bearing characteristics of mechanically alloyed Al–4.5 % Cu–Graphite composites // MPR: Metal Powder Rept. – 1988. – 43, № 1. – P. 37–38.
238. *Lim S. C., Liu K. S.* Effect of aging on abrasion rate in an Al–Zn–Mg–SiC composite // Wear. – 1988. – 121, № 1. – P. 1–14.
239. Friction and wear of aluminium–graphite composites the smearing process of graphite during sliding / *Y. B. Liu, S. C. Lim, S. Ray, P. K. Rohatgi* // Wear. – 1992. – 159, № 2. – P. 201–205.
240. Neue Aluminiumlegierung und Verarbeitungsverfahren bei Tieftemperaturen // Aluminium. – 1988. – 64, № 11. – S. 1091.
241. *Смирягин А. П., Смирягина Н. А., Белова А. В.* Промышленные цветные металлы и сплавы. – М.: Металлургия, 1974. – 488 с.
242. Особенности трения композиционных материалов на основе бронзы с твердой смазкой WS_2 в экстремальных условиях / *В. И. Апарин, Е. А. Духовской, В. Л. Мемелов, Е. Г. Осипова* // Трение и износ. – 1987. – 8, № 6. – С. 1026–1030.
243. *Баранов Н. Г., Падерно В. Н.* Исследование механизма формирования поверхностных пленок при трении медно-графитовых материалов // Трение и износ. – 1989. – 10, № 4. – С. 662–667.
244. Трибологическая оценка медно-графитовых покрытий в зависимости от дисперсности составляющих компонентов / *В. А. Ковтун, Л. А. Анистратенко, В. Г. Савкин* и др. // Трение и износ. – 1990. – 11, № 2. – С. 304–306.
245. Preparation and tribological evaluation of copper-graphite composites by high energy high rate powder consolidation / *K. S. Owen, M. J. Wang, C. Persad, Z. Eliezer* // Wear. – 1987. – 120, № 1. – P. 117–121.
246. *Анциферов В. Н., Смышляева Т. В., Шацов А. А.* Самосмазывающийся псевдосплав на основе меди для изделий антифрикционного и конструкционного назначения // Трение и износ. – 1996. – 17, № 4. – С. 497–502.
247. *Зозуля В. Д.* Принципы создания новых триботехнических СВС-материалов // Трение и износ. – 1994. – 15, № 3. – С. 422–428.
248. *Гаркунов Д. Н.* Эффект безызносности (избирательный перенос при трении) – новый этап в повышении износостойкости деталей машин // Пробл. машиностр. и автоматиз. (Москва–Будапешт). – 1986, № 11. – С. 38–43, 88, 90, 92.
249. *Поляков А. А.* Определение избирательного переноса в различных смазочных средах // Вестн. машиностр. – 1987, № 5. – С. 9–11.
250. *Буше Н. А., Миронов А. Е.* Тенденции развития металлических подшипниковых материалов // Трение и износ. – 1990. – 11, № 6. – С. 1112–1116.
251. *Миронов А. Е., Севастьянов В. В.* Разработка и внедрение новых высокопрочных баббитов для подшипников скольжения подвижного состава железнодорожного транспорта // Трение и износ. – 1995. – 16, № 1. – С. 76–80.
252. Microstructural refinement of tin base bearing alloys by adding selenium or tellurium / *M. Abdel-Reihim, N. Hess, M. Schaube, G. Weber* // Metall

(W.–Berlin). – 1985. – 39, № 9. – P. 817–821.
253. *Savaskan T., Murphy S.* Mechanical properties and lubricated wear of Zn–25Al based alloys // Wear. – 1987. – 116, № 2. – P. 211–224.
254. Metallic Glasses: Production, Properties and Applications / Ed. *T. R. Anantharaman.* – Aedermannsdorf: Trans. Tech. Publ. – 1984. – 1. – 302 p.
255. Некоторые особенности поведения аморфных материалов при трении / *И. М. Федорченко, Н. Г. Баранов, С. М. Захаров* и др. // Трение и износ. – 1985. – 6, № 6. – С. 1122–1127.
256. *Погосян А. К.* Трение и износ наполненных полимерных материалов. – М.: Наука, 1977. – 139 с.
257. Полимеры в узлах трения машин и приборов: Справочник / *А. В. Чичинадзе, А. Л. Левин, М. М. Бородулин, Е. В. Зиновьев.* – М.: Машиностроение, 1988. – 328 с.
258. Thermoplastic composite materials / Ed. *L. A. Carlsson* ets.: Elsevier, 1991. – 389 p.
259. *Friedrich K.* Friction and wear of polymer composites. – Amsterdam e. a.: Elsevier, 1986. – 465 p.
260. *Rymuza Z.* Tribologia polimerów slizgowych. – Warszawa: WNT, 1986. – 303 s.
261. Влияние температуры трения на строение поверхностного слоя и износостойкость АСП на основе полифенилхиноксалина / *В. В. Коршак, И. А. Грибова, А. П. Краснов* и др. // Трение и износ. – 1986. – 7, № 1. – С. 16–20.
262. *Lhymn C.* Lubricated wear of fiber-reinforced polymer composites // Wear. – 1988. – 122, № 1. – P. 13–31.
263. *Briscoe B. J., Yao L. H., Stolarski T. A.* The friction and wear of poly (tetrafluoroethylene) poly (etheretherketone) composites: an intial appraisal of the optimum composition // Wear. – 1986. – 108, № 4. – P. 357–374.
264. Hybrid series transition metal polymer composite sets: Пат. 5565417 США, МКИ С 10 М 125/ 00/ *V. F. Salvia*; Заявл. 26.6.95; Опубл. 15.10.96.
265. Антифрикционные композиционные полимерные материалы на основе СФД / *А. К. Погосян, К. В. Оганесян, А. Н. Карапетян, А. Э. Багдасарян* // Трение и износ. – 1998. – 19, № 1. – С. 97–103.
266. *Беспалов Ю. А., Коноваленко Н. Г.* Многокомпонентные системы на основе полимеров. – Л.: Химия, 1981. – 88 с.
267. *Мэнсон Дж., Сперлинг Л.* Полимерные смеси и композиты. – М.: Химия, 1979. – 440 с.
268. *Chun-Hai Qiu, Komppa V., Sivola A.* Tribological behaviour of compatibilized polyamide / ultra high molecular weight polyethylene blends // Tribologia. – 1997. – 16, № 2. – P. 21–32.
269. Бюллетень НТР : Проблемы и решения, 1988. – № 8 (69).
270. *Погосян А. К.* Полимерные самосмазывающиеся материалы // Трибология: Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ. – М.: Машиностроение; Нью-Йорк: Аллертон пресс, 1993. – С. 265–278.
271. Повышение износостойкости наполненного политетрафторэтилена путем оптимизации содержания наполнителей / *Ю. К. Машков, Л. М. Гадиева, Л. Ф. Калистратова* и др. // Трение и износ. – 1988. – 9, № 4. – С. 606–616.

272. *Иноземцев В. И., Белякова Г. В.* Исследование механизма изнашивания графитонаполненного поликапроамида // Трение и износ. – 1986. – 7, № 5. – С. 866–870.
273. *Краснов А. П., Чернявский А. И., Чернявская Н. А.* Влияние модифицирования олигоорганосиланом алифатических полиамидов на их триботехнические свойства // Трение и износ. – 1996. – 17, № 1. – С. 100–104.
274. *Кутьков А. А., Авдеев Д. Т., Малеванный В. И.* Антифрикционные композиции на основе пластифицированных полимеров // Трение и износ. – 1982. – 3, № 3. – С. 447–452.
275. Уплотнительный материал: А. с. 1460496 СССР, МКИ F 16 J 16/ 16 / *Д. Н. Любимов, В. В. Шахбазян, В. И. Колесников, В. Л. Потеха* и др. (СССР); Заявл. 27.07.87; Опубл. 23.02.89, Бюлл. 1989, № 7.
276. *Истомин Н. П., Семенов А. П.* Антифрикционные свойства композиционных материалов на основе фторполимеров. – М.: Наука, 1981. – 147 с.
277. *Лагунов В. С.* Композиционные тонкослойные материалы на основе фторопласта-4. – Воронеж: Изд-во ун-та, 1992. – 139 с.
278. *Черский И. Н., Козлов А. Г.* Физическая механика полимеров при низких температурах. – Новосибирск: Наука, 1976. – 136 с.
279. *Машков Ю. К.* К проблеме повышения износостойкости несмазываемых металлополимерных пар трения // Долговечность трущихся деталей машин; Вып. 3. – М.: Машиностроение, 1988. – С. 158–176.
280. *Watanabe M.* Wear mechanism of PTFE composites in aqueous environments // Wear. – 1992. – 158, № 1–2. – P. 79–86.
281. Модифицирование политетрафторэтилена эпоксисиликатом железа / *В. В. Биран, И. И. Злотников, В. В. Лисовский, В. Г. Савкин* // Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навукі – 1989. – № 3. – С. 25–27.
282. *Струк В. А., Дробышевская Н. И., Макаренко В. М.* Влияние ингибиторов коррозии на износостойкость пары трения политетрафторэтилен–металл // Трение и износ. – 1989. – 9, № 4. – С. 710–714.
283. *Виноградов А. В., Охлопкова А. А.* Износостойкость дисперснонаполненного политетрафторэтилена и критические концентрации ультрадисперсного наполнителя // Трение и износ. – 1995. – 16, № 5. – С. 931–937.
284. *Оддакас Ю. Н.* Исследование триботехнических свойств композиционного антифрикционного покрытия «АФТАЛ» при страгивании // Трение и износ. – 1990. – 11, № 5. – С. 858–862.
285. *Белый В. А., Довгяло В. А., Юркевич О. Р.* Полимерные покрытия. – Мн.: Наука и техника, 1976. – 416 с.
286. *Стухляк П. Д., Близнец М. М.* О влиянии оксидов металлов на износостойкость модифицированных эпоксидных смол // Трение и износ. – 1989. – 10, № 3. – С. 473–478.
287. *Близнец М. М., Дубровский В. С.* Влияние азотнокислой меди на износостойкость эпоксифурановых композиций // Трение и износ. – 1987. – 8, № 5. – С. 845–850.
288. *Айнбиндер С. Б., Логинова А. Я.* Износостойкость эпоксидных композиций, наполненных полиэтиленом высокой плотности // Трение и износ. – 1982. – 3, № 1. – С. 26–32.
289. *Котнаровска Д., Котнаровски А.* Влияние структуры полимерных покрытий на их износостойкость // Безызносность. – 1996. – № 4. – С. 109–116.
290. Алюминиевый поршень с защитным покрытием: Заявка 4310491 ФРГ, МКИ

F 02 F 3/ 10 / Mahle Gmbh; Заявл. 31.03.93; Опубл. 06.10.94.

291. *Вигдорович А. И., Сагалаев Г. В., Поздняков А. А.* Древесные композиционные материалы в машиностроении: Справочник. – М.: Машиностроение, 1991. – 233 с.
292. *Купчинов Б. И.* Древеснополимерные самосмазывающиеся материалы // Трение и износ. – 1987. – 8, № 5. – С. 822–828.
293. *Купчинов Б. И., Ермаков С. Ф., Пирназаров Р. Я.* Влияние кремнийорганических модификаторов на самосмазывающиеся свойства древеснополимерных материалов // Трение и износ. – 1991. – 12, № 1. – С. 63–71.
294. *Ревяко М. М.* Влияние добавок структурированного полиэтилена на триботехнические свойства прессованной древесины // Трение и износ. – 1986. – 7, № 1. – С. 178–180.
295. *Гольдаде В. А., Неверов А. С., Пинчук Л. С.* Низкомодульные композиционные материалы на основе термопластов. – Мн.: Наука и техника, 1984. – 231 с.
296. *Пинчук Л. С., Неверов А. С.* Герметизирующие полимерные материалы. – М.: Машиностроение, 1995. – 160 с.
297. *Мур Д.* Трение и смазка эластомеров. – М.: Химия, 1977. – 264 с.
298. *Давыдов А. П.* Резиновые подшипники в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1976. – 200 с.
299. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник / *Л. А. Кондаков, А. И. Голубев, В. В. Гордеев* и др. – М.: Машиностроение, 1994. – 445 с.
300. *Пинчук Л. С.* Герметология. – Мн.: Наука и техника, 1992. – 216 с.
301. Истирание резин / *Г. И. Бродский, В. Ф. Евстратов, Н. Л. Сахновский* и др. – М.: Химия, 1975. – 240 с.
302. *Лебедев В. М., Радченко В. М.* Оценка износостойкости резин, наполненных медным порошком // Трение и износ. – 1984. – 5, №2. – С. 278–283.
303. *Kurian J., Nando G. B.* Skanning electron microscopy studies on wear of HDPE-filled natural rubber vulcanizates // Wear. – 1988. – 127, № 2. – P. 139–147.
304. *Хаймович А. М., Булыгин А. С., Мартынов Н. В.* Изучение антифрикционных свойств резин с различными типами фторлоновых покрытий // Трение и износ. – 1982. – 3, № 4. – С. 749–752.
305. Антифрикционные свойства модифицированных резин / С. Н. Крылова, *М. Л. Уральский, Р. А. Горелик* и др. // Трение и износ. – 1986. – 7, № 3. –С. 542–545.
306. *Рогачев А. В., Казаченко В. П., Палий О. И.* Триботехнические свойства покрытий политетрафторэтилена, сформированных из активной газовой фазы // Трение и износ. – 1995. – 16, № 3. – С. 511–517.
307. *Чичинадзе А. В., Белоусов В. Я., Богатчук И. М.* Износостойкость фрикционных полимерных материалов. – Львов: Изд-во при Львовск. ун-те, 1989. – 143 с.
308. *Левит М. З., Щеренков Г. М.* Улучшение свойств полимерных композиций фрикционного назначения и создание нового класса изделий для транспортных машин // Трение и износ. – 1991. – 12, № 2. – С. 320–325.
309. *Bayer R. G., Payne N. G.* Wear evaluatuation of molded plastics // Lubr. Eng. – 1985. – 41, № 5. – P. 290–293.
310. Glass Fiber Based Friction Materials / *N. Subramaniam, R. R. Sinha, F. D. Blum* e. a. // Int. J. Polym. Mater. – 1991. – 15, № 2. – P. 93–102.
311. Полиимидный фрикционный материал: Заявка 62-137436 Япония, МКИ F

16 D 69/ 02; C 08 J 5/ 14 / *С. Токабаяси, Ф. Сатамити*; Заявл. 06.12.85; Опубл. 20.06.87.

312. *Шматько Е. А., Кизименко В. Д.* Использование анаэробных герметиков при сборке транспортных дизелей // Двигателестроение, – 1986. – № 8. – С. 37–39.
313. Износостойкое покрытие: Заявка 2205570 Великобритания, МКИ С 08 К 3/ 00 / *F. E. Johns*; ECC Int. Ltd; Заявл. 31.05.86; Опубл. 14.12.88.
314. Изготовление скользящих элементов из полиуретана, содержащего масло: Пат. 53-8734 Япония, МКИ С 08 L 75/ 04 / *М. Хорикава*; Заявл. 03.12.69; Опубл. 31.03.78.
315. *Tannenbaum R., Goldberg E. P., Flenniken C. L.* Decomposition of iron carbonyls in solid polymer matrices: preparation of novel metal-polymer composites // Metal-Contain. Polym. Syst. Organomet. Polym., Washington. D.C., 28–31 Aug., 1983. New-York; London. – 1985. – P. 303–339.
316. *Липатов Ю. С.* Будущее полимерных композиций. – Киев: Наук. думка, 1984. – 135 с.
317. *Гольдаде В. А., Неверов А. С., Пинчук Л. С.* Магнитоуправляемые материалы для подвижных уплотнений // Трение и износ. – 1981. – 2, № 4. – С. 708–712.
318. *Колесников В. И., Тер-Оганесян В. И.* Исследование влияния направления электрического поля в зоне контакта на износ металлополимерной пары трения // Влияние качества поверхности на эксплуатационные свойства подвижных сопряжений машин: Тез. докл. Всес. науч.-техн. конф., Рыбинск, – 1979. – С. 96–98.
319. *Мошков А. Д.* Пористые антифрикционные металлокерамические материалы. – М.: Машиностроение, 1968. – 246 с.
320. *Мамедов А. Т.* Порошковые материалы конструкционного и антифрикционного назначения. – Баку: Элм, 1991. – 186 с.
321. *Кайдас Ч.* Трибохимия керамики // Безызносность. – 1996. – № 4. – С. 58–73.
322. *Дроздов Ю. Н., Хуршудов А. Г., Панин В. И.* Метод выбора керамических материалов для пары трения кулачок-толкатель // Трение и износ. – 1993. – 14, № 3. – С. 479–486.
323. *Баранов Н. Г., Федорченко И. М.* Некоторые особенности фрикционного взаимодействия в паре трения металл–керамика // Трение и износ. – 1989. – 10, № 2. – С. 283–288.
324. Влияние скорости скольжения на износ пары керамика–сталь при трении без смазки / *А. М. Ковальченко, И. И. Осипова, Ю. Г. Гогоци* и др. // Трение и износ. –1992. – 13, № 6. – С. 654–663.
325. Влияние механических характеристик керамических материалов на закономерности трения и изнашивания пары керамика–сталь при трении со смазкой / *Ю. Н. Дроздов, А. Г. Хуршудов, В. Е. Мандрусов* и др. // Вестн. машиностр. – 1991. – № 2. – С. 12–15.
326. *Buckley D. H., Miyoshi K.* Fundamental tribological properties of ceramics // Ceram. Eng. and Sci. Proc. – 1985. – 6, № 7–8. – P. 919–935.
327. *Mehan R. L.* The wear of selected materials in mineral oil containing a solid contaminant // Wear. – 1988. – 124, № 1. – P. 65–85.
328. *Yust C. S., Leitnaker J. M., Devore C. E.* Wear of an alumina-silicon carbide whisker composite // Wear. – 1988. – 122, № 2. – P. 151–164.

329. *Jeng Ming-Chang, Yan Li-Yung.* Environmental effects on wear behaviour of alumina // Wear. – 1993. – 161, № 1–2. – P. 111–119.
330. *Hiratsuka K., Enomoto A., Sasada T.* Friction and wear of Al_2O_3, ZrO_2 and SiO_2 rubbed against pure metals // Wear. – 1992. – 153, № 2. – P. 361–373.
331. *Stachowiak G. W., Stachowiak G. B.* Environmental effects on wear and friction of toughened zirconia ceramics // Wear. – 1993. – 160, № 1. – P. 153–162.
332. *Akazawa M., Kato K., Umeya K.* Wear properties of silicon nitride in rolling contact // Wear. – 1986. – 110, № 3–4. – P. 285–293.
333. *Fischer T. E., Tomizawa H.* Interaction of tribochemistry and microfracture in the friction and wear of silicon nitride // Wear. – 1985. – 105, № 1. – P. 29–45.
334. *Jahanmir S., Fischer T. E.* Friction and wear of silicon nitride lubricated by humid air, water, hexadecane and hexadecane + 0.5 percent stearic acid // Tribol. Trans. [formely ASLE Trans]. – 1988. – 31, № 1. – P. 32–41.
335. *Rice R. W.* Micromechanics of microstructural aspects of ceramic wear // Ceram. Eng. and Sci. Proc. – 1985. – 6, № 7–8. – P. 940–959.
336. *Aronov V., Mesyef T.* Wear in ceramic/ ceramic and ceramic/ metal reciprocating sliding contact. Pt. 1 // Trans. ASME: J. Tribol. – 1986. – 108, № 1. – P. 16–21.
337. *Hanson R. A.* The adhesion and deformation properties of CVD TiC coated bearing balls under heavy loads // New Mater. Approaches Tribol.: Theory and Appl.: Symp., Boston, Mass., Nov. 29–Dec. 2 1988. – Pittsburg (Pa). – 1989. – P. 477–482.
338. *Petzow G.* Hochleistungskeramiken-Eine vielversprechende Werkstoffklasse // Berg. und Huttenmann. Monatsh. – 1991. – 136, № 9. – S. 361–366.
339. *Schuster E., Jacobsen A.* Glasskeramik–Werkstoff fur Zukunftstechnologien // Techn. Mitt. – 1987. – 80, № 8. – S. 522–526.
340. Древокерамика – новый пористый углеродный материал / *K. Kasai, T. Okabe, K. Saito* t. f. // J. Soc. Mater. Sci. Jap. – 1995. – 44, № 498. – P. 284–287.
341. *Fishman N.* Structural composites: a 1995 outlook // Mod. Plast. Int. – 1989. – 19, № 8. – P. 50–54.
342. *Сиренко Г. А.* Антифрикционные карбопластики. – Киев: Техника, 1985. – 195 с.
343. Kohlenstoffaserverstarkter Kohlenstoff ein Werkstoff fur Automobilbremsen / *E. Filzer, W. Fritz, A. Gkogkidis, K. D. Moergenthaler* // Sprechsaal. – 1986. – 119, № 6. – S. 463–466.
344. Трибологические характеристики полимерных композиционных материалов и углерод–углеродных композиций на их основе / *З. Ж. Овчарова, М. И. Любчева, И. М. Тодоров* и др. // Трение и износ. – 1992. – 13, № 2. – С. 373–377.
345. *Lhymn C.* Tribological properties of unidircetional polyphenylene sulfidecarbon fiber laminate composites // Wear. – 1987. – 117, № 2. – P. 147–159.
346. *Savage G. M.* Carbon–Carbon Composites // Chem. and Ind. – 1992. – № 14. – P. 525–529.
347. *Миронов В. С., Довгяло В. А., Юркевич О. Р.* Технологическое управление триботехническими характеристиками слоистых полимерных композитов // Трение и износ. – 1995. – 16, № 3. – С. 527–536.
348. *Козленко Б. Г., Ратнер С. Б.* Трение и износ углеграфитовых полимерных композиций с маслофреоновой смазкой // Трение и износ. – 1990. – 11,

№ 2. – С. 362–364.

349. Поиск оптимального состава антифрикционного карбоволокнита при одновременном варьировании количественных и качественных факторов / *Г. А. Сиренко, В. П. Свидерский, Н. Л. Немашкалова* и др. // Трение и износ. – 1990. – 11, № 5. – С. 903–906.
350. Введение волокон фторопласта-4 в углепластики как метод повышения их износостойкости / *В. А. Шелестова, Л. Ф. Иванов, П. Н. Гракович* и др. // Трение и износ. – 1996. – 17, № 5. – С. 699–702.
351. Углеродистый фрикционный материал: Заявка 63 - 47532 Япония, МКИ F 16 D 69/ 00 / *Я. Камацу, Х. Ивасиро, Т. Уэмура* и др.; Сева дэнко к. к.; Заявл.18.08.86; Опубл. 29.02.88.
352. *Павлоцкая Э. Г., Цалюк Р. Х., Мошкун В. Ф.* Триботехнические композиты с переменным содержанием графита по сечению // Перспективы повыш. ресурса и надеж. эксплуат. пар трения, смазывающ. раб. средами. – Киев. – 1987. – С. 58–62.
353. Антифрикционный материал на основе электрографита: Заявка 4025914 ФРГ, МКИ F 16 C 33/ 12; Заявл. 16.08.90; Опубл. 20.02.92.
354. *Фуголь В. А., Васильев Ю. Н.* Влияние ультрафосфатов на фрикционные свойства графита // Трение и износ. – 1988. – 9, № 2. – С. 349–354.
355. *Матвеевский Р. М.* Температурная стойкость граничных смазочных слоев и твердых смазочных покрытий при трении металлов и сплавов. – М.: Наука, 1971. – 228 с.
356. *Синицын В. В.* Пластичные смазки за рубежом: Справочник. – М.: Химия, 1983. – 328 с.
357. *Климов К. И.* Антифрикционные пластичные смазки. Основы применения. – М.: Химия, 1988. – 160 с.
358. Зарубежные масла, смазки, присадки и их отечественные аналоги: Междунар. кат./ Сост. *И. Н. Якунина, Н. В. Орлова.* – М.: Междунар. акад. информатиз., 1996. –152 с.
359. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: Справ. изд. / Под ред. *В. М. Школьникова.* – М.: Химия, 1989. – 432 с.
360. Справочник по триботехнике: В 3 т; Т. 2: Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения / Под ред. *М. Хебды, А. В. Чичинадзе.* – М.: Машиностроение, 1990. – 416 с.
361. *Heine W.* Technische und wirtschaftliche Vorteile synthetischer Getriebeschmierstoffe // Antriebstechnik. – 1988. – 27, № 5. – S. 110–115.
362. *Волобуев Н. К., Данилов В. Д., Кузнецов А. А.* Влияние ультрадисперсных порошков металлов на свойства смазочных материалов // Трение и износ. – 1994. – 15, № 5. – С. 871–876.
363. Исследование смазочных свойств масел с добавками медьсодержащих соединений / *Т. И. Назаренко, Н. Н. Лознецова, Г. Г. Щеголев* и др. // Трение и износ. –1992. – 13, № 2. – С. 324–327.
364. *Устрехова О. А., Ежикова-Бабаханова Т. Г., Басов Г. Б.* Некоторые особенности трибологических свойств полимерных присадок олефинового ряда // Трение и износ. – 1996. – 16, № 4. – С. 772–779.
365. Повышение долговечности узлов трения путем применения карбонофторидов / *Н. Д. Кузнецов, Д. Г. Громаковский, Л. И. Куксенова* и др. // Вестн. машиностр., 1987. – № 8. – С. 13–19.

366. *Первеев В. Ф., Точильников Д. Г., Гильман Я. А.* Эффективность антифрикционных молибденсодержащих присадок в судовых моторных маслах // Трение и износ. –1988. – 9, № 3. – С. 506–511.
367. *Arbabi H., Eyre T. S.* Investigation into the lubricating effectiveness of molybdenum disulphide dispersion in a fully formulated oil // Tribol. Int. – 1986. – 19, № 2. – P. 87–91.
368. Влияние нематического упорядочения на трение скольжения / *А. С. Василевская, Е. А. Духовской, А. А. Силин* и др. // Письма в ЖТФ. – 1986. – 12, № 12. – С. 750–752.
369. *Родненков В. Г.* Исследования трибологических свойств жидких кристаллов. Ч. II. Трибология масел, модифицированных жидкими кристаллами // Трение и износ. – 1996. – 17, № 3. – С. 391–401.
370. Повышение износостойкости и сроков службы деталей путевых машин / *Ю. А. Евдокимов, А. К. Алферов, А. А. Бураков* и др. – М.: Транспорт, 1985. – 88 с.
371. Использование новых хлор-фосфорсодержащих соединений в качестве присадок к смазочным маслам / *А. К. Погосян, Ю. С. Арустамян, Г. Р. Геворкян* и др. // Трение и износ. – 1997. – 18, № 6. – С.736–738.
372. Разработка полужидких смазок. II. Оценка по результатам реологических исследований некоторых эксплуатационных характеристик полужидких смазок / *К. К. Трилиский, Ю. Л. Ищук, Н. В. Жебровская* и др. // Трение и износ. –1987. – 8, № 4. – С. 704–709.
373. Смазочное масло: А. с. 451735 СССР, МКИ С 10 М 1/ 28 / *А. И. Свиридёнок, В. Г. Савкин, С. В. Щербаков* и др.; Заявл. 29.01.73; Опубл. в Бюл. изобр. № 44, 1974.
374. Смазка скользящих контактов электромеханических переключателей. – Ч. 2 / *В. В. Кончиц, Ю. Е. Кирпиченко, Г. А. Польщиков* и др. // Трение и износ. –1992. – 13, № 4. – С. 638–646.
375. *Измайлов В. В., Митюрев А. А.* Трибологические аспекты применения жидкометаллической межконтактной среды в электрических контактах // Трение и износ. – 1995. – 16, № 6. – С. 1133–1143.
376. *Шор Г. И.* Предпосылки экономичного применения масел с присадками // Нефтепереаб. и нефтехимия (Москва). – 1997. – № 2. – С. 26–29.
377. *Великовский Д. С., Хришановский П.* Консистентные смазки для мощных паровозов. – М.: Трансжелдориздат, 1934. – 61 с.
378. *Великовский Д. С.* Консистентные смазки. – М.: Гостоптехиздат, 1945. – 252 с.
379. *Фукс И. Г.* Пластичные смазки. – М.: Химия, 1972. – 160 с.
380. *Синицын В. В.* Подбор и применение пластичных смазок. – М.: Химия, 1974. – 414 с.
381. *Бонер К. Д.* Производство и применение консистентных смазок. – М.: Гостоптехиздат, 1958. – 703 с.
382. Реологические, противоизносные и противозадирные свойства пластичной смазки на основе растительного масла / *А. Т. Крачун, В. Е. Морарь, Г. И. Свищевская* и др. // Трение и износ. – 1991. – 12, № 5. – С. 930–934.
383. Влияние присадок сверхпластичных сплавов на антифрикционные свойства пластичных смазок / *В. Н. Стариков, И. П. Мазур, В. А. Лазбень* и др. // Трение и износ. – 1986. – 7, № 1. – С. 168–172.
384. Фторированный углерод как антифрикционная добавка к пластичным смаз-

кам / *В. В. Синицын, Ю. С. Викторова, А. И. Берденников, Ю. Б. Куценок* // Трение и износ. – 1981. – 2, № 6. – С. 996–1000.

385. Синтетические пластичные смазки с улучшенными служебными свойствами: Пат. 5147567 США, МКИ С 10 М 105/ 80 / *V. S. Agarwala* e. a.; USA Secretary of the Navy; Заявл. 04.04.71; Опубл. 15.09.92.
386. О механизме противоизносного действия и результатах испытаний пластичной смазки с трибополимеробразующим загустителем / *Р. Н. Заславский, В. Д. Асриева, Ю. С. Заславский* и др. // Трение и износ. – 1981. – 2, № 1. – С. 125–133.
387. Использование стеклянных микросфер в качестве наполнителей пластичных смазок / *А. А. Калинин, Н. И. Замятина, В. Г. Мельников* и др. // Трение и износ. – 1991. – 12, № 3. – С. 557–560.
388. Снижение фреттинг-износа металлов под действием фуллерена С60 / *Б. М. Гинзбург, В. А. Красный, Ю. П. Козырев, В. П. Булатов* // Трение и износ. – 1997. – 18, № 4. – С. 523–526.
389. Смазка «Гретерол-1»: А. с. 1284990 СССР, МКИ С 10 М 169/ 04, 117:02, 125:18, 129:8, 129:16, 145:04; С 10 N 30:60 / *В. В. Терегеря, М. Н. Гребенюк*; Опубл. в Бюлл. изобр. 1987, № 3.
390. *Северинчик Н. А., Пыж Р. М.* Пластичные резьбовые смазки и их герметизирующая способность // Трение и износ. – 1989. – 10, № 4. – С. 712–715.
391. *Сентюрихина Л. Н., Опарина Е. М.* Твердые дисульфидмолибденовые смазки. – М.: Химия, 1966. – 152 с.
392. *Вайнштейн В. Э., Трояновская Г. И.* Сухие смазки и самосмазывающиеся материалы. – М.: Машиностроение, 1968. – 179 с.
393. Трение и износ в вакууме / *И. В. Крагельский, И. М. Любарский, А. А. Гусляков* и др. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
394. *Брейтуэйт Е. Р.* Твердые смазочные материалы и антифрикционные покрытия. – М.: Химия, 1967. – 320 с.
395. *Кутьков А. А., Щеголев В. А.* Структурно-кинетические аспекты антифрикционности материалов // Трение и износ. – 1980. – 1, № 2. – С. 209–216.
396. *Васильев Ю. Н.* Природа смазочной способности графита // Трение и износ. – 1983. – 4, № 3. – С. 483–491.
397. *Сергеева Л. М.* О влиянии окружающей среды на износ твердых смазок // Теоретические и прикладные задачи трения, износа и смазки машин. – М.: Наука, 1982. – С. 275–277.
398. *Ноженков М. В.* О низком трении твердых тел // Трение и износ. – 1987. – 8. – № 3. – С. 459–466.
399. *Канакия М. Д., Петерсон М. Б.* Механизм действия твердых смазок // Трибология: Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ. – М.: Машиностроение; Нью-Йорк: Аллертон пресс, 1993. – С. 237–265.
400. *Крачун С. В., Крачун А. Т., Морарь В. Е.* Исследование новых твердых смазочных материалов // Трение и износ. – 1989. – 10, № 3. – С. 487–492.
401. Фторсодержащие твердые смазочные покрытия / *Е. В. Шелудько, Г. А. Ковтун, О. Н. Цыпина, А. В. Нестеров* // Трение и износ. – 1997. – 18, № 6. – С. 739–743.
402. Трибологическое поведение твердосмазочных покрытий / М. Бабич, *Б. Еремич, М. Майер* и др. // Трение и износ. – 1995. – 16, № 2. – С. 284–290.
403. *Barry H. F.* Factors relating to the performance of MoS_2 as a lubricant // ASLE

Lubr. Eng. – 1977. – 33, № 9. – P. 475–480.
404. *Анциферов В. Н., Шацов А. А.* Трение и изнашивание порошковой бронзы оптимального состава // Трение и износ. – 1996. – 17, № 2. – С. 213–217.
405. *Centers P. W.* Tribological performance of MoS_2, Sb_2O_3 or MoO_3 and Sb_2C_3 // Wear. – 1988. – 122, № 1. – P. 97–102.
406. Исследование работоспособности твердых смазочных покрытий с бинарным антифрикционным компонентом / *Л. Н. Сентюрихина, Т. П. Юхно, Г. Д. Гамуля* и др. // Трение и износ. – 1987. – 8, № 1. – С. 74–82.
407. *Барц В.* Трибологические характеристики трехкомпонентных твердосмазочных покрытий // Трение и износ. – 1986. – 7, № 5. – С. 791–797.
408. *Bartz W. J., Holinski R.* Synergistische Effekte bei der Anwendung von Festschmierstoffen in gebundener Form (1) // Tribol. und Schmierungstechn. – 1986. – 33, № 3. – S. 140–146.
409. *Zabiński J. S., Donley M. S., Mc Devitt N. T.* Mechanistic study of the synergism between Sb_2O_3 and MoS_2 lubricant systems using Roman spectroscopy // Wear. – 1993. – 165, № 1. – P. 103–108.
410. Термофрикционные свойства дисульфида молибдена, интеркалированного гетероциклическими соединениями / *А. П. Краснов, О. В. Афоничева, В. А. Мить* и др. // Трение и износ. – 1996. – 17, № 6. – С. 799–801.
411. *Roberts E. W.* Thin solid lubricant films in space // Tribology Int. – 1990. – 23, № 2. – P. 95–105.
412. *Jamison W. E., Nelson C. D., Cuckler J. H.* New developments in microporous polymer lubricants // Lubr. Eng. – 1985. – 41, № 5. – P. 274–279.
413. *Абрамзон А. А., Зайченко Л. П., Файнгольд С. И.* Поверхностно-активные вещества. Синтез, анализ, свойства, применение. – Л.: Химия, 1988. – 200 с.
414. *Адамсон А.* Физическая химия поверхностей. – М.: Мир, 1979. – 568 с.
415. *Берковский Б. М., Медведев В. Ф., Краков М. С.* Магнитные жидкости. – М.: Химия, 1989. – 239 с.
416. Физико-химические и трибологические свойства магнитных жидкостей / *В. Д. Данилов, Н. К. Волобуев, Н. В. Гульдина* и др. // Трение и износ. – 1994. – 15, № 5. – С. 856–863.
417. *Демкин Н. Б., Болотов А. Н., Лочагин Н. В.* Магнитные свойства ферромасел // Долговечность трущихся деталей машин; Вып. 5. – М.: Машиностроение, 1990. – С. 292–299.
418. *Михалев Ю. О., Земляков А. М., Орлов Д. В.* Влияние магнитного поля на триботехнические характеристики магнитных смазок // Трение и износ. – 1987. – 8, № 2. – С. 288–292.
419. *Болотов А. Н., Созонтов К. К., Орлов Д. В.* О роли структурных компонентов магнитного масла в условиях граничной смазки // Трение и износ. – 1991. – 12, № 5. – С. 824–831.
420. *Орлов Д. В., Подгорков В. В.* Магнитные жидкости в узлах трения // Трение и износ. – 1985. – 6, № 4. – С. 581–586.
421. *Подгорков В. В.* Несущая способность магнитных жидкостей // Трение и износ. – 1990. – 11, № 2. – С. 359–361.
422. *Курапов П. А.* Магнитные жидкости в качестве смазочных материалов // Трение и износ. – 1994. – 15, № 5. – С. 849–855.
423. *Павлов В. Г., Дроздов Ю. Н.* Применение магнитного способа подачи смаз-

ки в узлы сухого трения // Вестн. машиностр. – 1974. – № 10. – С. 39–40.
424. Узлы трения с магнитоактивным порошковым смазочным материалом / *Ю. Н. Дроздов, В. Г. Павлов, Р. И. Фишман* и др. // Вестн. машиностр. – 1986. – № 9. – С. 23–26.
425. Смазочные свойства магнитоактивных смазок на основе дисульфида молибдена/ *В. И. Апарин, Л. О. Вайсфельд, Ю. Н. Дроздов* и др. // Трение и износ. – 1984. – 5, № 4. – С. 701–704.
426. *Дьячков А. К.* Развитие гидродинамической теории смазки применительно к задачам современного машиностроения // Трение и износ. – 1981. – 2, № 2. –С. 197–211.
427. Использование предельных одноатомных спиртов в качестве компонентов смазочных композиций на водной основе / *Р. М. Матвеевский, А. А. Калинин, В. Г. Мельников* и др. // Трение и износ. – 1983. – 4, № 1. – С. 68–73.
428. *Sullivan J. L., Middleton M. R.* The effect of water based fire resistant lubricants on the pitting of steel // Mixed. Lubr. and Lubr. Wear: Proc. 11th Leeds-Lyon Symp. Trib., 4–7 Sept., 1984. London e. a. – 1985. – P. 164–169, 170–175.
429. *Yamada Y., Tanaka K.* Effect of the degree of crystallinity on the friction and wear of poly (ethylene terephthalate) under water lubrication // Wear. – 1986. – 111, № 1. – P. 63–72.
430. *Lancaster J. K.* Lubricated wear of polymers // Mixed Lubr. and Lubr. Wear: Proc. 11th Leeds-Lyon Symp. Tribol., 4–7 Sept., 1984. London e. a. – 1985. – P. 213–223, 242–243.
431 *Tanaka K.* Friction and wear of semicrystalline polymers sliding against steel under water lubrication // Trans. ASME J. Lubric. Technol. – 1980. – 102, № 4. – P. 526–533.
432. *Калинин А. А.* Смазочная способность водосодержащих жидкостей на основе триэтаноламина // Трение и износ. – 1987. – 8, № 2. – С. 320–324.
433. *Sullivan J. L., Middleton M. R.* The pitting and cracking of SAE 52100 steel in rolling/ sliding contact in the presence of an aqueus lubricant // ASLE Prepr. ASME / ASLE Lubr. Conf., San Diego, Calif., 22–24 Oct., 1984. Techn. Prepr. Park Ridge, ill., s. a., 3C4/ 1–3C4/ 7.
434. Зацепина Г. Н. Физические свойства и структура воды. – М.: Изд-во МГУ, 1987. – 171 с.
435. *Рогов В. М., Филипчук В. Л.* Электрохимическая технология изменения свойств воды. – Львов: Вища шк., 1989. – 127 с.
436. Envitec-Aussteller berichten Gleitlager umweltfreundlich geschmiert // Giesserei. – 1992. – 79, № 16. – S. 71–73.
437. *Bisht R. P. S., Savasankaran G. A., Bhatia V. K.* Additive properties of Jojoba oil for lubricating oil formulations // Wear. – 1993. – 161, № 1–2. – P. 193–197.
438. *Крачун А. Т., Морарь В. Е., Крачун С. В.* Исследование смазочных свойств некоторых растительных масел // Трение и износ. – 1990. – 11, № 5. – С. 929–932.
439. *Hubmann A.* Rapsol – ein alternatives Basisol fur Schmierstoffe // Mineraloltechnik. – 1989. – № 10. – S. 1–20.
440. Влияние биоповреждения трансмиссионных масел на триботехнические характеристики / *В. В. Павлова, Г. К. Сорокин, С. И. Кулаков, М. С. Фельдман* // Трение и износ. – 1994. – 15, № 5. – С. 883–888.

441. Смазочное масло – конструкционный элемент машин и механизмов / *К. М. Бадыштова, Т. Н. Шабалина, Г. И. Леонович* и др. // Трение и износ. – 1995. – 16, № 5. – С. 918–924.
442. Матричный синтез – новый путь создания композиционных антифрикционных материалов / *И. А. Грибова, Г. И. Гуреева, А. И. Кузнецов* и др. // Трение и износ. – 1992. – 13, № 1. – С. 195–200.
443. *Коршак В. В., Грибова И. А., Краснов А. П.* О явлении трибохимической смазки при трении гетероцепных полимеров // Высокомолек. соедин. – Сер. Б. – 1985. – 27, № 5. – С. 323–324.
444. *Тетерин Г. А., Монахов В. Н., Мамонтов Ю. Н.* Активирование нерастворимых в маслах антифрикционных добавок // Химия и технол. топлив и масел. – 1991. – № 3. – С. 17–19.
445. Трение и изнашивание полиарилата, импрегнированного комплексом меди в сверх критической CO_2 / *А. П. Краснов, Э. Е. Саид-Галиев, Л. Н. Никитин* и др. // Трение и износ. – 1998. – 19, № 1. – С. 90–96.
446. In-situ development of a silicon nitride/ amorphous silicon oxynitride nanocoposite microstructure / *P. J. Patel, G. A. Glide, L. Sengapta* e. a. // Mater. And Manuf. Processes [Adv. Mater. And Manuf. Process.]. – 1996. – 11, № 6. – P. 987–998.
447. Nanokristalline Werkstoffe mit verbluffenden Eigenschaften // Schweiz. Maschinenmarkt. – 1992. – 92, № 17. – S. 36–37, 39.
448. Материал, превращающийся при трении в аморфный: Пат. 4725512 США, МКИ B 05 D 3/ 06; B 32 B 15/ 00 / Dresser Ind., Inc.; Заявл. 08.06.84; Опубл. 16.02.88.
449. The mechanical structures of bamboos in viewpoint of functionally gradient and composite materials / *S. Amada, T. Munekata, Y. Nagase* e. a. // J. Compos. Mater. – 1996. –30, № 7. – P. 800–819.
450. Новые материалы с микросетчатыми структурами / *К. Иита, С. Тоесава* // Nihon kikai gakkaishi = J. Jap. Soc. Mech. Eng. – 1996. – 99, № 928. – С.46.
451. Использование понятия искусственной нейронной сети для разработки новых материалов / *G. Yagawa, H. Okuda* // Nihon kikai gakkaishi = J. Jap. Soc. Mech. Eng. –1996. – 99, № 929. – С. 246–250.
452. Конструирование машин: Справ.-метод. пособие. – Т. 2 / Ред. *К. В. Фролов*. – М.: Машиностроение, 1994. – 624 с.
453. *Силин А. А.* Трение и мы. – М.: Наука, 1987. – 192 с.
454. *Гаевик Д. Т.* Подшипниковые опоры современных машин. – М.: Машиностроение, 1985. – 248 с.
455. *Кузнецов В. Д.* Физика резания и трения металлов и кристаллов: Избранные труды. – М.: Наука, 1977. – 310 с.
456. *Войтов В. А.* О расположении материалов в парах трения по твердости и конструктивных способах повышения износостойкости // Трение и износ. – 1994. –15, № 3. – С. 452–460.
457. *Евдокимов В. Д.* Реверсивность трения и качество машин. – Киев: Техника, 1977. – 148 с.
458. *Войтов В. А., Жерняк А. М., Суханов М. И.* Масштабный фактор пары трения и его учет на этапе проектирования машин и механизмов // Трение и износ. – 1994. – 15, № 1. – С. 109–115.
459. *Болотов А. Н., Хренов В. Л.* Триботехника подшипниковых опор и направ-

ляющих скольжения с магнитной разгрузкой. Теоретические и прикладные аспекты. – Тверь: Гос. техн. ун-т, 1996. – 59 с.

460. *Косточкин В. В.* Надежность авиационных двигателей и силовых установок. – М.: Машиностроение, 1976. – 248 с.
461. Материалы триботехнического назначения: Пат. 4571358 США, МКИ В 32 В 3// 10/ *N. P. Suh, S. Burgess*; Заявл. 10.05.84; Опубл. 18.02.86.
462. *Фальц Э.* Основы смазочной техники. – М. – Л.: Госмашметиздат, 1934. – 344 с.
463. *Комбалов В. С., Зайцев М. В.* К вопросу нормирования протяженности фактического контакта и шага микроканавок поверхностей с частично регулярным микрорельефом (ЧРМР) // Трение и износ. – 1992. – 13, № 1. – С. 110–115.
464. Композитная втулка для подшипников сухого трения: Заявка 2555265 Франция, МКИ F 16 C 33/ 20/ *E. L. S. Helene*; Заявл. 18.11.83; Опубл. в РЖ Маш. мат. 1986, № 4, 378П.
465. *Junior D. D., Junior M. K., Tu C.* Sliding surface profiling for fatique prevention in big end con-rod bearings // SAE Techn. Pap. Ser. – 1988. – № 880570. – 17 p.
466. *Елизаветин М. А.* Повышение надежности машин. – М.: Машиностроение, 1968. – 267 с.
467. *Михин Н. М., Сляднев М. А.* Повышение нагрузочной способности и триботехнических свойств резинометаллических подшипников скольжения с помощью автокомпенсации износа // Трение и износ. – 1990. – 11, № 2. – С. 213–221.
468. Обеспечение автокомпенсации износа рабочих поверхностей трибосопряжений за счет применения металлоплакирующих присадок к смазочным материалам / *С. И. Кулаков, В. К. Черкасов, В. В. Павлова* и др. // Долговечность трущихся деталей машин; Вып. 4. М.: Машиностроение, 1990. – С. 274–279.
469. *Галахов М. А., Бурмистров А. Н.* Расчет подшипниковых узлов. – М.: Машиностроение, 1988. – 271 с.
470. *Коднир Д. С., Жильников Е. П., Байбородов Ю. И.* Эластогидродинамический расчет деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 160 с.
471. Методика расчетной износостойкости поверхностей трения деталей машин / *И. В. Крагельский, А. В. Блюмен, Г. М. Харач* и др. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 100 с.
472. *Никитин А. К., Ахвердиев К. С., Остроухов Б. И.* Гидродинамическая теория смазки и расчет подшипников скольжения, работающих в стационарном режиме. – М.: Наука, 1981. – 316 с.
473. *Богатин О. Б., Моров В. А., Черский И. Н.* Основы расчета полимерных узлов трения. – Новосибирск: Наука, 1983. – 213 с.
474. *Дроздович В. Н.* Газодинамические подшипники. – Л.: Машиностроение, 1976. – 208 с.
475. *Пинегин С. В.* Газовая смазка в машинах и приборах // Трение и износ. – 1980. – 1, № 4. – С. 573–583.
476. Подшипник скольжения: Пат. 4717268 США, МКИ F 16 C 33/ 20 / *S. S. Orkin*; Kamatics Corp.; Заявл. 03.01.84; Опубл. 05.05.88.
477. Самосмазывающийся подшипник скольжения: Заявка 3633164 ФРГ, МКИ F 16 C 33/ 10 / *G. Lorenz*; Заявл. 30.09.86; Опубл. 10.09.87.

478. Долговечный многослойный подшипник скольжения: Пат. 5362574 США, МКИ F 16 C 33/ 12 / *T. Tanaka, M. Sakamoto, Y. Sato*; Daido Metal. Co. Ltd.; Заявл. 27.04.93; Опубл. 08.11.94.
479. Шаровой шарнир: Пат. 4995754 США, МКИ F 16 C 11/ 06 / *I. Shoji*; Rhythm Motor Parts Mfg., Co., Ltd.; Заявл. 04.05.89; Опубл. 26.02.91.
480. Радиальный подшипник скольжения с твердой смазкой: А. с. 1167366 СССР, МКИ F 16 C 17 / 02, 33/ 10 / *А. В. Румянцев* и др.; Заявл. 03.04.84; Опубл. в Бюл. изобр. 1985, № 26.
481. *Болотов А. Н., Хренов В. Л.* Триботехника подшипниковых опор и направляющих скольжения с магнитной разгрузкой // Трение и износ. – 1995. – 16, № 6. – С. 1048–1069.
482. Магнитный подшипник: Заявка 2612266 Франция, МКИ F 16 C 32/ 04 / *H. Vaillant de Guelis, J-P. Roland, P. Jamain*; Заявл. 13.03.87; Опубл. 16.09.88.
483. Многоклиновой гидродинамический подшипник скольжения: Заявка 60-95215 Япония, МКИ F 16 C 17/ 03 / *Я. Мацуяма*; Заявл. 28.10.83; Опубл. в РЖМаш. мат. 1986, 5, 359П.
484. *Комиссар А. Г.* Опоры качения в тяжелых режимах эксплуатации: Справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 384 с.
485. *Перель Л. Я., Филатов А. А.* Подшипники качения: Расчет, проектирование и обслуживание опор: Справочник. – М.: Машиностроение, 1992. – 606 с.
486. *Foot C. W.* Rolling bearins. – Kempes Eng. Year-Book, 1992. Vol. 1.1. – Tonbridge, 1992. – P. E2/ 1–E2/ 45.
487. Подшипник с твердой смазкой: Заявка 91 / 14108 Междунар. РСТ, МКИ F 16 C 33/ 37/ *W. J. Van, D. Zornes, B. Zornes*; Balanced Eng. Inc.; Заявл. 05.03.90; Опубл. 19.09.91.
488. *Hannoosh J. G.* Ceramic bearings enter the mainstream // Des. News. – 1988. – 44, № 22. – P. 224–225, 228, 233.
489. Самосмазывающийся подшипник качения: Заявка 62-246621 Япония, МКИ F 16 C 33/ 66, C 10 M 107/ 00 / *М. Эгами*; Иобэа Рурон когё к. к.; Заявл. 16.04.86; Опубл. 27.10.87.
490. Элемент подшипника качения: Заявка 4409733 ФРГ, МКИ F 16 C 33/ 58 / *W. Haubelt*; INA W. S. KG.; Заявл. 22.03.94; Опубл. 28.9.95.
491. *Reusner H.* Подшипники с роликами логарифмического профиля // Кикай то когу (Tool Eng.). – 1989. – 33, № 6. – С. 103–109.
492. Способ изготовления деталей, пропитанных смазочным материалом, и использование этого способа для изготовления деталей подшипников качения: Заявка 2656828 Франция, МКИ B 29 C 67/ 20 / *A. Marchand*; Matra; Заявл. 10.01.90; Опубл. 12.07.91.
493. Сепаратор роликоподшипника: Заявка 3811958 ФРГ, МКИ F 16 C 33/ 66 / *P. Dreschmann, H. Gutsche*; FAG K.G.S. KgaA; Заявл. 11.04.88; Опубл. 19.10.89.
494. Подшипник качения, свободный от трения скольжения: Заявка 4343418 ФРГ, МКИ F 16 C 19/ 20 / *M. Hampel*; Заявл. 18.12.93; Опубл. 26.05.94.
495. Bearing with lubricating ring for providing supplemental lubrication: Пат. 5349026 США, МКИ F 16 C 33/ 66 / *D. C. Witte*; The Timken Co.; Заявл. 12.12.92; Опубл. 21.03.95.
496. *Kakuta K.* The state of the art of rolling bearing system technology // JSME Int., J. Ser. 3. – 1989. – 32, № 2. – P. 179–186.

497. Ein Gehause fur mehrere Wellendurchmesser // Antrieb. – 1989. – 35, № 2. – S. 35.
498. Walz – und Gleitlagerungen // Konstruktion. – 1989. – 41, № 6. – S. A28–A34.
499. *Боголюбов А. Н.* Творения рук человеческих: Естественная история машин. – М.: Знание, 1988. – 176 с.
500. *Лозовский В. Н.* Надежность и долговечность золотниковых и плунжерных пар. – М.: Машиностроение, 1971. – 232 с.
501. *Аксенов А. Ф., Лозовский В. Н.* Износостойкость авиационных топливно-гидравлических агрегатов. – М.: Транспорт, 1986. – 240 с.
502. *Мелкумян С. А.* О применении эффекта безызносности в плунжерных парах трения насосов // Трение и износ. – 1990. – 11, № 4. – С. 736–739.
503. *Асташкевич Б. М.* Трибологические аспекты изнашивания деталей цилиндропоршневой группы мощных двигателей внутреннего сгорания // Трение и износ. –1995. – 16, № 1. – С. 92–105.
504. Поршневое кольцо с лазерноупрочненной рабочей поверхностью: Заявка 63-38765 Япония, МКИ F 16 J 9/ 20, F 02 F 5/ 20 / *К. Такахаси*; К. к. Фикэн; Заявл. 04.08.86; Опубл. 19.02.88.
505. Износостойкие триботехнические материалы для пары поршень–цилиндр: Заявка 61-174399 Япония, МКИ С 25 D 7/ 00, С 22 С 1/ 09 / *И. Фува, Х. Митиока, Й. Татэмацу*; Тоёта дзидося; Заявл. 28.01.85; Опубл. 06.08.86.
506. *Valenti M.* Stemming the flood of counterfeit fasteners // Mech. Eng. – 1993. – 115, № 2. – P. 46–49.
507. *Крагельский И. В., Михин Н. М.* Узлы трения машин: Справочник. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
508. *Биргер И. А., Иосилевич Г. Б.* Резьбовые и фланцевые соединения. – М.: Машиностроение, 1990. – 368 с.
509. *Заблонский К. И., Мак С. Л.* Влияние конструктивных форм деталей машин на их долговечность. – Киев: Техника, 1971. – 184 с.
510. Auf Nummer sichert Flussigsicherungsmittel bei Schraubverbindungen // Konstruktionspraxis. – 1992. – № 4. – S. 176.
511. Nun mach mal einen Punkt. Mikrogekapselte Klebstoffe zum Sichern und Dichten // Konstruktionspraxis. – 1992. – № 5. – S. 60.
512. *Белый В. А., Старжинский В. Е., Щербаков С. В.* Металлополимерные зубчатые передачи. – Мн.: Наука и техника, 1981. – 352 с.
513. *Гришко В. А.* Повышение износостойкости зубчатых передач. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.
514. *Хаймзон М. Е., Кораблев А. И.* Работоспособность авиационных зубчатых соединений. – М.: Транспорт, 1983. – 177 с.
515. *Сидоренко А. К.* Новые виды зубчатых передач. – М.: Машиностроение, 1990. – 128 с.
516. Магнитная зубчатая передача: А. с. 1698529 СССР, МКИ F 16 H 1/ 06 / *В. В. Арсеньев*; Заявл. 22.02.89; Опубл. 15.12.91, Бюл. № 46.
517. Bauteilpaarung: Заявка 4428999 ФРГ, МКИ F 16 H 57/ 12/ *C.-H. Lang, G. Lechner*; Inst. Fur Masch. Univ. Stuttgart; Заявл. 16.08.94; Опубл. 22.02.96.
518. Исследование износостойкости зубчатых колес с упругим соединением обода и ступицы / *О. В. Берестнев, С. А. Беляев, И. И. Гарбар* и др. // Трение и износ. – 1980. – 1, № 2. – С. 325–333.
519. Зубчатое колесо с керамической накладкой: Заявка 62-251562 Япония, МКИ

F 16 H 55/ 17 / *К. Ямасита*; Бабукокку Хитати к. к.; Заявл. 24.04.86; Опубл. 02.11.87.

520. One-way gear trains: Заявка 2295878 Великобритания, МКИ F 16 H 55/ 08 / *R. F. Schiller*; Sony UK Ltd.; Заявл. 06.12.94; Опубл. 12.06.96.
521. *Мышкин Н. К.* Трибологические аспекты использования электрических контактов // Трение и износ. – 1984. – 5. – № 1. – С. 34–42.
522. *Кончиц В. В.* Износ в скользящем контакте электрических машин // Трение и износ. – 1986. – 7, № 2. – С.223–233.
523. *Берент В. Я., Гершман И. С.* Вторичные структуры на поверхности сильноточных скользящих контактов. III. Механизм появления, роста и разрушения вторичных структур // Трение и износ. – 1990. – 11, № 1. – С. 85–92.
524. *Узикова Т. И.* Флуктуации переходного сопротивления скользящих металлических контактов // Трение и износ. – 1995. – 16, № 6. – С. 1144–1151.
525. *Туктаев И. И.* Влияние конструктивных особенностей контактных аппаратов электрических машин на износ щеток // Трение и износ. – 1982. – 3, № 6. – С. 1094–1105.
526. *Туктаев И. И., Чиндяскин В. И.* Учет влияния динамических факторов и тока при анализе изнашивания параллельно включенных электрощеток // Трение и износ. – 1985. – 6, № 6. – С. 1097–1108.
527. *Гречищев Е. С., Ильяшенко А. А.* Соединения с натягом. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.
528. *Балацкий Л. Т.* Прочность прессовых соединений. – Киев: Техника, 1982. –151 с.
529. *Балацкий Л. Т.* Усталость валов в соединениях. – Киев: Техника, 1972. – 180 с.
530. *Уотерхауз Р. Б.* Фреттинг-коррозия. – Л.: Машиностроение, 1976. – 272 с.
531. Соединение вал–втулка на клею: Заявка 60-109620 Япония, МКИ F 16 D 27/ 14 / *К. Нисадзава*; Заявл. 14.11.83; Опубл. 25.06.85.
532. Соединение вал–втулка: Заявка 0200800 ЕПВ, МКИ F 16 B 13/ 02 / *F. Astl*; Заявл. 08.05.85; Опубл. 12.11.86.
533. Соединение вал–втулка: Заявка 4312687 ФРГ, МКИ F 16 D 1/ 04; Заявл. 20.04.93; Опубл. 27.10.94.
534. *Скундин Г. И., Никитин В. Н.* Шлицевые соединения. – М.: Машиностроение, 1981. – 128 с.
535. Шлицевое соединение: Заявка 62-113915 Япония, МКИ F 16 D 1/ 10, G 03 G 15/ 00/ *Х. Вакахара, К. Имаи*; Мацусита дэнки санге к. к.; Заявл.08.11.85; Опубл. 25.05.87.
536. Телескопический вал: Пат. 4575360 США, МКИ F 16 J 15/ 32, F 16 D 3/ 06 / *R. N. Brissette*; Заявл. 18.07.83; Опубл. 11.03.86.
537. Шлицевое соединение: Пат. 4552544 США, МКИ F 16 C 3/ 03, F 16 D 3/ 06 / *J. A. Beckman*; Заявл. 27.12.82; Опубл.12.11.85.
538. Шлицевое соединение с шариками: Пат. 4695170 США, МКИ F 16 C 29/ 06 / *H. Teramachi*; Заявл. 10.10.86; Опубл. 22.09.87.
539. Беззазорное шлицевое соединение: Пат. 4685823 США, МКИ F 16 D / *N. E. Lopez*; The Boeing Co.; Заявл. 23.12.80; Опубл. 11.08.87.
540. Шлицевое соединение: А. с. 870785 СССР, МКИ F 16 D 3/ 06 // C 23 F 15/ 00 / *С. А. Лапшин, В. Е. Захаров, Л. А. Полякова*; Заявл. 17.08.79; Опубл. в

Бюл. изобр. 1981, № 37.
541. *Тамулевич Г. Д., Бобылев Г. Г.* Приводные ремни. – М.: Химия, 1990. – 168 с.
542. *Андреев А. В.* Передача трением. – М.: Машиностроение, 1978. – 176 с.
543. Зубчатый ремень с накладками: Заявка 3931480 ФРГ, МКИ F 16 G 1/ 28, 5/ 20/ *R. Breher, R. Kolling*; Breco Kurst. – Ges. GmbH und Co KG.; Заявл. 21.09.89; Опубл. 04.04.91.
544. Плоскоременная передача: Пат. 4995855 США, МКИ F 16 H 7/ 02 / *K. Nasebe, H. Matsuoka, K. Yanagi*; Bando Chemical Ind. Inc.; Заявл. 11.08.89; Опубл. 26.02.91.
545. Клиновые и поликлиновые ремни: Заявка 4316917 ФРГ, МКИ F 16 G 5/ 14 / *R. Modder, A. Straub*; The Gates Rubber Co., Volkswagen AG.; Заявл. 20.05.93; Опубл. 24.11.94.
546. Малошумный зубчатый ремень: Заявка 4239300 ФРГ, МКИ F 16 G 1/ 28 / *A. Bottger*; Заявл. 23.11.92; Опубл. 28.05.94.
547. Зубчатый ремень: Пат. 5417618 США, МКИ F 16 G 5/ 20 / *N. Osako, T. Murakami, Y. Nakai*; Mitsuboshi Belting Ltd.; Заявл. 04.07.94; Опубл. 23.05.95.
548. *Muller J., Mauersbeiger K.* Leonardo da Vinci–Seine Beziehungen zum Kurvengetriebe im Vorfeld der Technikwissenschaften // Wiss. Z. Univ., Rostock, Naturwiss. R. – 1990. – 39, № 6. – S. 99–141.
549. *Мишин И. А.* Долговечность двигателей. – Л.: Машиностроение, 1976. – 288 с.
550. *Венцель С. В.* Смазка и долговечность двигателей внутреннего сгорания. – Киев: Техника, 1977. – 208 с.
551. Кулачковый механизм: Заявка 2663091 Франция, МКИ F 16 C 32/ 06 / *J. F. Melchior*; Заявл. 08.06.90; Опубл. 13.12.91.
552. Электромагнитная передача винт–гайка: Заявка 3931430 ФРГ, МКИ F 16 C 32/ 04, F 16 H 25/ 20 / *J. Engel, B. Sachse*; Asea Brown Boveri AG.; Заявл. 21.09.89; Опубл. 04.04.91.
553. Передача винт–гайка: Пат. 5090265 США, МКИ F 16 H 25/ 24 / *A. H. Slocum*; Заявл. 14.11.88; Опубл. 25.02.92.
554. Spindelmuttern // Antriebstechnik. – 1995. – 34, № 2. – S. 118.
555. Прецизионная передача винт–гайка: Пат. 5252015 США, МКИ F 16 B 39/ 12/ *W. S. Davis*; Заявл. 04.11.91; Опубл. 02.10.93.
556. *Продан В. Д.* Техника герметизации разъемных неподвижных соединений. – М.: Машиностроение, 1991. – 160 с.
557. Уплотнительная прокладка: Пат. 4839221 США, МКИ F 16 J 15/ 12, C 08 K 3/ 34/ *H. Asaumi* and at.; Nichias Corp.; Заявл. 09.10.87; Опубл. 13.06.89.
558. Уплотнительная лента: Заявка 4105367 ФРГ, МКИ F 16 J 15/ 12 / *H. J. Tuckmantel*; Kempchen & Co. GmbH.; Заявл. 21.02.91; Опубл. 03.09.92.
559. Уплотнительная прокладка: Заявка 3725456 ФРГ, МКИ F 16 J 15/ 10 / *G. Bolzer*; Bayerische Motoren Werke AG.; Заявл. 31.07.87; Опубл. 09.02.89.
560. Уплотнительное кольцо: Пат. 4165079 США, МКИ F 16 J 9/ 20; Заявл. 02.08.78; Опубл. 21.08.79.
561. PTFE – Dichtelemente mit eingebetteter Edelstahlfeder // Ind. – Auz. – 1996. – 118, № 16. – S. 210.
562. «Flussiger» O-Ring // Konstruktion. – 1996. – 48, № 5. – S. A31.
563. *Крылов К. А., Хаймзон М. Е.* Долговечность узлов трения самолетов. – М.:

Транспорт, 1976. – 184 с.
564. *Жеглов О. С., Соколов В. Ю., Кремешный В. М.* Повышение долговечности ограниченно подвижных шарниров в условиях коррозионно-механического изнашивания // Трение и износ. – 1982. – 3, № 5. – С. 850–859.
565. Повышение износостойкости шарнирных соединений подбивочных блоков путевых машин / *А. Г. Суслов, В. В. Агафонов, В. М. Хохлов* и др. // Трение и износ. – 1990. – 11, № 3. – С. 504–508.
566. *Стеценко Е. Г., Конарев Ю. Н.* Коленчатые валы тепловозных дизелей. – М.: Транспорт, 1985. – 110 с.
567. Кулачковый вал: Заявка 4427201 ФРГ, МКИ F 16 H 53/ 02 / *F. Klaas, H. Bogel*; Gesenkschmiede Schneider GmbH.; Заявл. 01.08.94; Опубл. 01.06.95.
568. Кулачковый вал: Заявка 4430906 ФРГ, МКИ F 16 H 53/ 02 / *P. Reipert, H. Marcus, C. Asoke*; Заявл. 31.08.94; Опубл. 07.03.96.
569. Композитный вал: Пат. 5439416 США, МКИ F 16 C 3/ 02 / *T. R. Jaskowiak*; Хегох Corp.; Заявл. 24.12.90; Опубл. 08.08.95.
570. *Гребеник В. М., Гордиенко А. В., Цапко В. К.* Повышение надежности металлургического оборудования: Справочник. – М.: Металлургия, 1988. – 688 с.
571. Подшипник скольжения: Заявка 60-155010 Япония, МКИ F 16 C 3/ 02, 33/ 20/ *K. Wehevb*; Заявл. 21.01.84; Опубл. 14.08.85.
572. Пластмассовый распределительный вал / *Тан Эйдзи* // Nihon kikai gakkaishi = J. Jap. Soc. Mech. Eng. – 1997. – 100, № 942. – С. 566.
573. *Spur G., Kranz A.* CFK–Wellen im Maschinenbau: Marktvolumen-Struktur-Tendenzen// Kunststoffe. – 1996. – 86, № 6. – S. 869–871.
574. *Левин М. А., Фуфаев Н. А.* Теория качения деформируемого колеса. – М.: Наука, 1989. – 269 с.
575. *Кузнецов Ю. В.* Сцепление автомобильной шины с дорожным покрытием. – М.: МАДИ, 1985. – 106 с.
576. *Hayd A., Maurer M.* Solid state physics of friction // Wear. – 1986. – 113, № 1. – P. 87–101.
577. *Чихос Х.* Системный анализ в трибонике. – М.: Мир, 1982. – 352 с.
578. *Барвелл Ф. Т.* Взаимосвязь между научными исследованиями и практикой в трибологии // Трение и износ. – 1986. – 7, № 5. – С. 780–790.
579. *Никитин С. В., Тихомиров В. П., Кукина О. С.* Синтез трибосистем с использованием методов поискового конструирования // Трение и износ. – 1988. – 9, № 5. – С. 941–947.
580. *Booser E. R., Wilcock D. F.* New charts improve elliptical bearing design // Mach. Des. – 1988. – 60, № 10. – P. 87–88, 90.
581. *Munk K.* Konstruktive Walzlager-Losungen fur hohe Auforderungen // Technica (Suisse). – 1994. – 43, № 3. – S. 33–38.
582. *Schmidt K.* Lager mit Kopfchen Kompakte Lagereinheit erhoht Drehzahl und Drehrichtung // Werkstatt und Betr. – 1997. – 130, № 6. – S. 33–34.
583. *Bullough W. A.* The third wave of machines // Endeavour. – 1996. – 20, № 2. –P. 50–55.
584. *Мур Д.* Основы и применения трибоники. – М.: Мир, 1978. – 488 с.
585. *Полевой С. Н., Евдокимов В. Д.* Упрочнение металлов: Справочник. – М.: Машиностроение, 1986. – 320 с.
586. *Молодык Н. В., Зенкин А. С.* Восстановление деталей машин. – М.: Машиностроение, 1989. – 479 с.

587. *Суслов А. Г.* Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
588. *Кузнецов Н. Д., Цейтлин В. И., Волков В. И.* Технологические методы повышения надежности деталей машин: Справочник. – М.: Машиностроение, 1993. – 304 с.
589. *Рыжов Э. В.* Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. – Киев: Наук. думка, 1984. – 272 с.
590. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными методами / *А. Г. Бойцов, В. Н. Машков, В. А. Смоленцев, Л. А. Хворостухин.* – М.: Машиностроение, 1991. – 144 с.
591. Технологические основы обеспечения качества машин / *К. С. Колесников, Г. Ф. Баландин, А. М. Дальский* и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.
592. *Кестельман В. Н.* Физические методы модификации полимерных материалов. – М.: Химия, 1980. – 224 с.
593. *Белый А. В., Карпенко Г. Д., Мышкин Н. К.* Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев. – М.: Машиностроение, 1991. – 204 с.
594. *Ящерицын П. И., Скорынин Ю. В.* Работоспособность узлов трения машин. – Мн.: Наука и техника, 1984. – 288 с.
595. *Ящерицын П. И., Скорынин Ю. В.* Технологическая и эксплуатационная наследственность и ее влияние на долговечность машин. – Мн.: Наука и техника, 1978. – 120 с.
596. *Соболев Н. И., Титунин Б. А.* Пластинирование деталей машин. – Л.: Машиностроение, 1987. – 224 с.
597. *Прядилов В. И., Бобылев А. В.* Свинцовистые бронзы // Труды НАТИ. – 1933; Вып. 22. – С. 77–104.
598. *Веслополев Ю. И.* Определение оптимальной толщины баббитового слоя в подшипниках скольжения // Машиностроитель. – 1993. – № 1. – С. 8–9.
599. *Буше Н. А.* Трение, износ и усталость в машинах (Транспортная техника). – М.: Транспорт, 1987. – 223 с.
600. Restauracion de cojinetes antifreccion de gran tamano por fundicion centrifugada. Part.II. / *M. E. Calzadilla, G. J. Castello, P. C. Romero, H. A. Casneros* // Constr. Mag. – 1986. – 11, № 4. – S. 46–50.
601. Образование «третьего тела» и положительный градиент механических свойств на примере химико-механического нанесения латунного покрытия / *Г. Польцер, А. Фирковский, Х-Й. Рейнхольд* и др. // Трение и износ. – 1992. – 13, № 1. – С. 67–70.
602. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) и избирательный перенос / *Г. Польцер, А. Фирковский, И. Ланге* и др. // Долговеч. трущ. деталей машин; Вып. 5. – М.: Машиностроение, 1990. – С. 86–122.
603. *Плетнев Д. В., Брусенцова В. Н.* Основы технологии износостойких и антифрикционных покрытий. – М.: Машиностроение, 1968. – 272 с.
604. *Бородин И. Н.* Порошковая гальванотехника. – М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.
605. Электрохимические методы повышения долговечности деталей машин / *Н. А. Марченко, С. Х. Липко, А. Н. Мотрохова* и др. – Киев: Техника, 1969. – 136 с.
606. *Макаров К. А., Зытнер Я. Д., Мышленникова В. А.* Электрохимические по-

лимерные покрытия. – Л.: Химия, 1982. – 128 с.
607. *Рафф А. В.* Модифицированные поверхностные слои и покрытия // Трибология: Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ. – М.: Машиностроение; Нью-Йорк: Аллертон пресс, 1993. – С. 190–201.
608. Влияние композиционных покрытий на качество приработки и износостойкость трущихся сопряжений автотракторных двигателей / *И. И. Маликов, В. А. Иванов, Л. Ф. Котягов* и др. // Трение и износ. – 1985. – 6, № 1. – С. 125–132.
609. Элемент трения скольжения: Пат. 5340660 США, МКИ С 23 F 3/ 00; Honda Giken Kogyo k. k.; Заявл. 20.07.92; Опубл. 23.08.94.
610. *Ивкович Б.* Сопротивление изнашиванию элементов трибомеханических систем как функция условий механической обработки поверхности // Трение, износ и смазочные материалы: Труды междун. науч. конф., Ташкент, 22–26 мая 1985. – Т. 1. – М., 1985. – С. 272–275.
611. *Рыжов Э. В.* Научные основы технологического управления качеством поверхности деталей при механической обработке // Трение и износ. – 1997. – 18, № 3. – С. 293–300.
612. *Маталин А. А.* Технология механической обработки. – М.: Машиностроение, 1977. – 464 с.
613. *Родненков В. Г.* Исследование трибологических свойств жидких кристаллов.Ч. III. Применение жидких кристаллов в трибосистемах // Трение и износ. – 1997. – 18, № 5. – С. 694–705.
614. *Гдалевич А. И.* Финишная обработка лепестковыми кругами. – М.: Машиностроение, 1990. – 112 с.
615. *Вадас Э.* Изготовление и ремонт деталей машин с пластмассовым покрытием. – М.: Машиностроение, 1986. – 320 с.
616. *Пугачев А. К., Росляков О. А.* Переработка фторопластов в изделия: Технология и оборудование. – Л.: Химия, 1987. – 168 с.
617. *Красовский А. М., Никонов Б. И.* Влияние толщины на фрикционные свойства тонких полимерных пленок // Трение и износ. – 1986. – 7, № 6. – С. 965–968.
618. *Холодилов О. В., Тишков Н. И., Кирпиченко Ю. Е.* Влияние условий формирования на фрикционные свойства полиэтиленовых покрытий // Трение и износ. – 1985. – 6, № 3. – С. 505–509.
619. *Гартман Е. В., Миронович Л. Л.* Износостойкие защитные полимерные покрытия // Трение и износ. – 1996. – 17, № 5. – С. 682–685.
620. *Ахматов А. С.* Молекулярная физика граничного трения. – М.: Госиздат физ.-мат. лит-ры, 1963. – 472 с.
621. *Zhang J., Xue Q.* Langmuir-Blodgett Film and Its Tribological Behavior // Tribology. – 1992. – 12, № 2. – P. 97–104.
622. Снижение износов и коэффициентов трения при использовании эпилама в качестве покрытия и присадки в смазочную среду / *Р. М. Матвеевский, Л. Ю. Пружанский, А. С. Куракин* и др. // Тез. докл. Всес. науч. конф., посвящ. 1000-летию г. Брянска, октябрь 1985. – М., 1985. – С. 147–148.
623. Влияние строения фторсодержащих олигомеров на фрикционные свойства низкоскоростных узлов трения / *В. А. Струк, П. Н. Богданович, Е. В. Овчинников* и др. // Трение и износ. – 1996. – 17, № 3. – С. 386–390.
624. Влияние энергетических факторов на структуру фторсодержащих олигомеров / *В. А. Струк, Е. И. Ивченко, Е. В. Овчинников* и др. // Докл. АН Бе-

ларуси. – 1996. – 40, № 2. – С. 117–120.

625. Природа и механизмы действия эпиламов при трении. I. Влияние эпиламирования на структуру и поверхностную энергию металла / *И. И. Гарбар, А. С. Кисель, Н. А. Рябинин* и др. // Трение и износ. – 1990. – 11, № 5. – С. 792–800.

626. Природа и механизмы действия эпиламов при трении. II. Триботехнические характеристики эпиламированных материалов / *И. И. Гарбар, А. С. Кисель, Н. А. Рябинин* и др. // Трение и износ. – 1990. – 11, № 6. – С. 987–995.

627. *Гулянский Л. Г.* Применение эпиламирования для повышения износостойкости изделий // Трение и износ. – 1992. – 13, № 4. – С. 695–701.

628. *Деликатная И. О.* К оценке влияния отдельных составляющих масел на трение твердых тел // Трение и износ. – 1996. – 17, № 5. – С. 686–689.

629. Физические закономерности изнашивания эпиламированных поверхностей / *И. И. Гарбар, С. В. Логинов, Н. А. Рябинин* и др. // Тез. докл. Всес. науч. конф., посвящ. 1000-летию г. Брянска, октябрь 1985. – М., 1985. – С. 147–148.

630. *Лахтин Ю. М., Арзамасов Б. Н.* Химико-термическая обработка металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.

631. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: Справочник / *Г. В. Борисенок, Л. А. Васильев, Л. Г. Ворошнин* и др. – М. : Металлургия, 1981. – 424 с.

632. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / Л. С. Ляхович, *Г. В. Борисенок, Л. А. Васильев* и др. – М.: Металлургия, 1981. – 424 с.

633. *Бройде З. С., Ларин М. Л., Марченко Е. А.* Материаловедческие и трибологические аспекты создания износостойких композиционных покрытий SILICO // Трение и износ. – 1997. – 18, № 2. – С. 213–217.

634. *Спиридонов Н. В., Девойно О. Г.* Повышение эксплуатационных характеристик диффузионных боридных слоев лазерной обработкой // Трение и износ. – 1986. –7, № 2. – С. 372–376.

635. *Siecla T.* Wplyw dogniatania na wlasnosci azotowanej stali 40H // Zesz. nauk. porn.: Masz. robocze i pojazdy. – 1985. – № 25. – S. 37–47.

636. Получение поверхностного слоя на стали, свободного от дефектов: Заявка 2206131 Великобритания, МКИ С 23 С 8/ 26, С 22 С 38/ 00 / *С. Dawes*; Tranter D.F.; Lucas Int. Plc.; Заявл. 25.02.85; Опубл. 29.12.88.

637. *Леонтьев П. А., Чеканова Н. Т., Хан М. Г.* Лазерная поверхностная обработка металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1986. – 141 с.

638. *Григорьянц А. Г.* Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.

639. *Семенов А. П.* Создание износостойких и антифрикционных покрытий и слоев на поверхностях трения деталей машин новыми методами // Трение и износ. – 1982. – 3, № 3. – С. 401–411.

640. *Кикин П. Ю., Пчелинцев А. И., Русин Е. Е.* Абразивное изнашивание сталей, обработанных разными комбинациями ударно-волнового и термического лазерного воздействия // Трение и износ. – 1992. – 13, № 3. – С. 524–527.

641. Способ соединения с натягом деталей типа вал-втулка: А. с. 1199558 СССР, МКИ В 23 Р 11/ 02 / *В. М. Ходаковский* и др.; Заявл. 05.12.83; Опубл. в Бюлл. изобр. 1985, № 47.

642. Шейка вала с упрочнением: Заявка 60-234119 Япония, МКИ F 16 C 3/ 02, C 21 D 9/ 28 / *Т. Фукумидзу, Х. Ноноями*; Заявл. 07.05.84; Опубл. в РЖМаш. мат. 1987, 2. 328П.

643. *Przemeck K., Zum G. K.-H.* Gefuge und tribologische Eigenschaften von TiO_2 / Nb_2O_5 laserlegierter Al_2O_3-Keramik // Keram. Z. – 1997. – 49, № 2. – S. 97–98, 100–103.

644. *Лазаренко Б. Р., Лазаренко Н. И.* Электроискровая обработка токопроводящих материалов. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 184 с.

645. *Немилов Е. Ф.* Справочник по электроэрозионной обработке материалов. – Л.: Машиностроение, 1989. – 164 с.

646. *Фотеев Н. К.* Технология электроэрозионной обработки. – М.: Машиностроение, 1980. – 184 с.

647. *Смоленцев В. П.* Достижения и проблемы электрических методов обработки материалов // Вестн. машиностр. – 1991. – № 2. – С. 36–40.

648. *Носовский И. Г., Крамар В. Г., Носовский О. И.* Влияние электроискрового легирования поверхностных слоев на их износостойкость и антифрикционность // Трение и износ. – 1996. – 17, № 2. – С. 241–245.

649. *Дорожкин Н. Н., Петюшев Н. Н.* Дуговая газопорошковая наплавка. – Мн.: Беларусь, 1989. – 94 с.

650. Износостойкие наплавочные материалы и высокопроизводительные методы их обработки / *И. А. Толстов, М. Н. Семиколенных, Л. В. Баскаков, В. А. Коротков.* – М.: Машиностроение, 1992. – 221 с.

651. *Меликов В. В.* Многоэлектродная наплавка. – М.: Машиностроение, 1988. – 144 с.

652. *Сидоров А. И.* Восстановление деталей машин напылением и наплавкой. – М.: Машиностроение, 1987. – 192 с.

653. *Зайченко Ю. А., Сенаторов С. А.* Восстановление и упрочнение узлов трения индукционно-металлургическим способом // Опыт ремонта подвиж. состава на специализир. постах и участках трансп. и дор. предприятий в свете реализ. прогр. Интенсиф.- 90.: Матер. науч.-техн. семин., 16–17 декабря 1986. – Л., 1986. – С. 50–53.

654. *Шейнман Е. Л.* Износ легированных наплавок // Трение и износ. – 1995. – 16, № 5. – С. 986–988.

655. *Быковский Ю. А., Неволин В. Н., Фоминский В. Ю.* Ионная и лазерная имплантация металлических материалов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 237 с.

656. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками / Под ред. *Д. М. Поута* и др. Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1987. –424 с.

657. *Белый А. В., Макушок Е. М., Поболь И. Л.* Поверхностная упрочняющая обработка с применением концентрированных потоков энергии. – Мн.: Наука и техника, 1990. – 179 с.

658. Влияние фазового состава на износостойкость ионно-плазменных покрытий из нитрида титана / *Г. С. Фукс-Рабинович, А. А. Кацура, В. Ф. Моисеев* и др. // Трение и износ. – 1989. – 10, № 4. – С. 742–744.

659. *Дэйвис Дж. А., Вилбур П. Дж.* Имплантация ионов бора для трибологического применения // Трение и износ. – 1997. – 18, № 6. – С. 722–729.

660. *Машков Ю. К., Грязнов Б. Т., Чечуков Н. Т.* Влияние ионной имплантации на триботехнические характеристики металлополимерных пар трения

// Трение и износ. – 1986. – 7, № 6. – С. 1079–1085.
661. Влияние ионной имплантации на механические и фрикционные свойства ферромагнитных пленок группы железа / *П. В. Павлов, Д. И. Тетельбаум, Е. В. Курильчик* и др. // Трение и износ. – 1987. – 8, № 2. – С. 309–314.
662. *Hirano M., Miyake S.* The reduction of adhesion by ion imlantation // Trans. ASME: J. Tribol. – 1985. – 107, № 4. – P. 417–471.
663. *Richter E.* Verschleißschutz durch ionenimplantation // Schmierungstechnik. – 1985. – 16, № 11. – S. 324–326.
664. Применение многослойных ионно-плазменных покрытий для повышения долговечности поршневых пар ДВС / *В. В. Любимов, А. А. Воеводин, А. Л. Ерохин* и др. // Трение и износ. – 1992. – 13, № 5. – С. 935–938.
665. Несмазываемая опора скольжения: Пат. 4824262 США, МКИ F 16 C 29/ 00, 33/ 02/ *O. Kamigaito, H. Doi, S. Noda, M. Kouzaki*; K. K. Toyota Chuo Kenkyusho.; Заявл. 25.09.87; Опубл. 25.04.89; Приор. 27.09.86, № 61-229066 (Япония).
666. *Барвинок В. А.* Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.
667. *Данилин Б. С.* Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 327 с.
668. *Куприянов И. Л., Геллер М. А.* Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления. – Мн.: Наука и техника, 1990. – 176 с.
669. *Харченков В. С.* Технологическое обеспечение износостойкости деталей машин нанесением многослойных покрытий // Трение и износ. – 1997. – 18, № 3. – С. 331–338.
670. *Muller M.* Verbesserung der Dauerfestigkeit und des Verschleissverhaltens der Kubelwellen des Motors 5D49 (BR 130...132) // Schienenfahrzeuge. – 1990. – 34, № 5. – S. 230.
671. *Стухляк П. Д., Коржик В. Н., Шкодзинский О. К.* Исследование триботехнических характеристик пары эпоксидный композит–плазменное аморфное покрытие // Трение и износ. – 1990. – 11, № 3. – С. 556–559.
672. *Одинцов Л. Г.* Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 327 с.
673. *Чепа П. А., Андрияшин В. А.* Эксплуатационные свойства упрочненных деталей. – Мн.: Наука и техника, 1988. – 192 с.
674. *Шнейдер Ю. Г.* Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. – Л.: Машиностроение, 1982. – 248 с.
675. Zając B. Tribologiczne wlasciwosci warstwy wierchniej mosiądzu konstytuowanej nagniataniem. – Czestochowa: Wyd. PCREST, 1991. – 125 s.
676. О повышении износостойкости стальных и чугунных деталей поверхностным пластическим деформированием / *Л. М. Белкин, С. М. Гунзелев, М. Я. Белкин* и др. // Трение и износ. – 1986. – 7, № 5. – С. 935–939.
677. *Шатуров Г. Ф., Спасский И. В.* Исследование поверхностного слоя гильз ДВС, обработанных методом ИСВ // Современные проблемы триботехнологии: Тез. докл. Всес. науч.-техн. конф. – Николаев: НКИ. – 1988. – С. 44–45.
678. Алексеев П. Г., Семякин В. С. Эффекты магнитного и электростатического воздействия в процессе поверхностного пластического деформирования // Трение и износ. – 1994. – 15, № 4. – С. 676–681.
679. *Головин Г. Ф., Замятнин М. М.* Высокочастотная термическая обработка:

Вопросы металловедения и технологии. – 3-е изд., перераб., доп. – Л.: Машиностроение, 1990. – 239 с.

680. *Федюкин В. К., Смагоринский М. Е.* Термоциклическая обработка металлов и деталей машин. – Л.: Машиностроение, 1989. – 255 с.

681. *Москатов К. А.* Термическая обработка пластмассовых и резиновых деталей машин. – М.: Машиностроение, 1976. – 200 с.

682. *Кестельман Н. Я.* Термическая обработка полимерных материалов в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1968. – 268 с.

683. *Хрущов М. М.* Применение поверхностной закалки в машиностроении в связи с проблемами третьей пятилетки // Вестн. металлопромышленности. – 1937. – № 12. – С. 3–13.

684. *Bhargawa A. K., Tiwari A. N.* Rapidly solidifred 17-7PH stainless steel containing boron: Abrasive wear behaviour // Int. J. Rapid Solidificat. – 1996. – 9, № 3. – P. 159–169.

685. *Люты В.* Закалочные среды: Справочник / Пер. с пол. – Челябинск: Металлургия, 1990. – 190 с.

686. *Ельников Н. Н., Лаптева В. Г., Халин В. А.* Применение обработки холодом и лазерной закалки для повышения износостойкости плоских направляющих станочного оборудования // Трение износ. – 1993. – 14, № 5. – С. 855–859.

687. *Бернштейн М. Л., Пустовойт В. Н.* Термическая обработка стальных изделий в магнитном поле. – М.: Машиностроение, 1987. – 256 с.

688. *Малыгин Б. В.* Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин. – М.: Машиностроение, 1989. – 112 с.

689. Повышение износостойкости деталей машин комплексным магнитно-электрическим способом / *Г. С. Шулев, П. В. Сысоев, Э. И. Дмитриченко, В. А. Люцко* // Трение и износ. – 1987. – 8, № 5. – С. 938–943.

690. *Гаркунов Д. Н., Суранов Г. И., Коптяева Г. Б.* О природе повышения износостойкости деталей и инструмента магнитной обработкой // Трение и износ. – 1982. – 3, № 2. – С. 326–330.

691. *Зозуля В. Д., Качин А. Р., Юхвид В. И.* Триботехнические свойства наплавочных покрытий, полученных методом самораспространяющегося синтеза // Трение и износ. – 1992. – 13, № 3. – С. 528–532.

692. *Boving H. J., Hintermann H. E.* Wear-resistant hard titanium carbide coatings for space applications // Tribology Int. – 1990. – 23, № 2. – P. 129–134.

693. Влияние объемного распределения заряда на фрикционные характеристики полимерного электрета / *Ю. И. Воронежцев, В. А. Гольдаде, Л. С. Пинчук, Г. В. Речиц* // Трение и износ. – 1984. – 5, № 1. – С. 138–142.

694. *Дроздов Ю. Н., Усов С. В.* Использование комбинированных технологических методов для повышения износостойкости деталей машин // Вестн. машиностр. – 1985. – № 10. – С. 9–11.

695. *Аверченков В. И.* Формализация методов технологического проектирования, обеспечивающих требуемое качество изделий // Трение и износ. – 1997. – 18, № 3. – С. 339–348.

696. Исследование износостойкости упрочненных пар трения скольжения / *С. А. Астапчик, Ф. И. Пантелеенко, А. Л. Лисовский, В. И. Снеговец* // Трение и износ. – 1997. – 18, № 2. – С. 229–234.

697. *Глушков В. М.* Основы безбумажной информатики. – М.: Наука, 1987. – 552с.

698. *Коган И. М.* Прикладная теория информации. – М.: Радио и связь, 1981. – 216 с.

699. *Холодилов О. В., Пилипович Т. П., Петроковец М. И.* Русско-белорусско-английский толковый словарь в области трения, изнашивания и смазки / Под общ. ред. проф., д. т. н. *Н. К. Мышкина.* – Гомель: ИНФОТРИБО, 1996. – 174 с.

700. *Демкин Н. Б., Замятин А. Ю.* Общий подход и направления развития распределенной трибологической сети // Трение и износ. – 1995. – 16, № 6. – С. 1168–1172.

701. Национальные информационные базы данных по трибологии / *Н. Л. Голего, С. М. Захаров, А. П. Буря, М. Э. Натансон* // Трение и износ. – 1988. – 9, № 6. – С. 1103–1108.

702. *Гамуля Г. Д., Коптева Т. А., Пастухов Ю. В.* Фактографическая автоматизированная информационно-поисковая система по трению и изнашиванию материалов ТИМ КРИОВАК // Трение и износ. – 1991. – 12, № 1. – С. 154–162.

703. Разработка оболочек баз данных по триботехническим свойствам полимерных композитов, металлов и методам их поверхностной модификации / *А. Л. Жарин, С. М. Захаров, О. В. Холодилов, А. В. Белый* // Трение и износ. – 1994. – 15, № 3. – С. 482–503.

704. *Холодилов О. В., Кирпиченко Ю. Е.* Компьютеризованная система поиска трибологической информации // Трение и износ. – 1994. – 15, № 4. – С. 623–627.

705. *Kohlhaas G.* Tribological field service by the use of a computerized data system // Proc. 6th Int. Cong. on Tribology. EUROTRIB'93. Budapest-Hungary, 1993. – V. 5. –P. 434–440.

706. *Neugebauer S.* FAG Walzlagerdarstellungssystem W.D.S.-Mehr Qualitat und Produktivitat in CAD-Anwendungen // Walzlagertechnik. – 1991. – № 502. – S. 13–17.

707. *Аверченков В. И.* Автоматизация проектно-конструкторских работ по обеспечению износостойкости деталей машин // Тез. докл. Всес. науч. конф. Износ в машинах и методы защиты от него, посвящ. 1000-летию г. Брянска, октябрь 1985. – М., 1985. –С. 140–141.

708. Построение экспертных систем / Ред. *Ф. Хейес-Рот* и др. Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 441 с.

709. *Бохуа Н. К., Геловани В. А., Ковригин О. В.* Экспертные системы: опыт проектирования. – М.: Междунар. НИИ пробл. упр.; ВНИИ систем. исслед. АН СССР, 1990. – 348 с.

710. *Rowe W. B., Cheng K., Ives D.* A knowledge-based system for the selection of fluid film journal bearings // Tribology Int. – 1991. – 24, № 5. – P. 291–298.

711. *Su Y. L., Lin J. S., Hsieh S. K.* The tribological failure diagnosis of spur gear by an expert system // Wear. – 1993. – 166, № 2. – P. 187–196.

712. *Tallian T. E.* A computerized expert system for tribological failure diagnosis // Trans. of the ASME, J. of Tribology. – 1989. – № 2. – P. 238–245.

713. *Крагельский И. В., Силин С. С., Замятин Ю. П.* Триботехника в высшей школе // Трение и износ. – 1981. – 2, № 3. – С. 427–432.

714. *Геккер Ф. Р., Купреянов А. А.* Триботехника – новая инженерная специальность // Трение и износ. – 1998. – 19, № 2. – С. 265–268.

715. *Чичинадзе А. В., Геккер Ф. Р., Лужнов Ю. М.* Трибология и триботехни-

ка: ее значение и место в подготовке инженерных кадров // Alma mater. – 1993. –№ 1. – С. 53–54.

716. *Bartz W. J.* Tribological Relationship as Basis for Solution of Friction and Wear Problems // Friction-Wear-Lubrication-Design. Theory and practice of tribology: Proc. 6th Int. Congress on Tribology. EUROTRIB'93. Budapest-Hungary, 1993. – V. 1. – P. 10–43.

717. *Вольф Э. Л., Куприянов Н. А., Кащеев В. Н.* Введение в трибонику и трибологические отказы: Учеб. пособие. – Томск: Том. политехн. ун-т, 1991. – 102 с.

718. *Икрамов У. А., Левитин М. А.* Основы трибоники: Учеб. пособие. – Ташкент: Укитувчи, 1984. – 184 с.

719. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / *Э. Д. Браун, Н. А. Буше, И. А. Буяновский* и др. / Под. ред. *А. В. Чичинадзе*: Учебник для техн. вузов. – М.: Центр «Наука и техника», 1995. – 778 с.

720. Химмотология пластичных смазок: Учеб. пособие / *Н. Н. Гришин, С. Б. Шибряев, И. А. Прокопьев* и др. – М.: ГАНГ им. Губкина, 1994. – 147 с.

721. *Pytko S.* Podstawy tribologii i techniki smarowniczej. – Kraków: Wyd-wo AGH, 1989. – 235 s.

722. *Петроковец М. И.* Библиография трибологических изданий СССР и СНГ // Трибология: Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ. – М.: Машиностроение; Нью-Йорк: Аллертон пресс, 1993. – С. 444–448.

723. Лудема К. Библиография трибологической литературы на английском языке // Трибология: Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ. – М.: Машиностроение; Нью-Йорк: Аллертон пресс, 1993. – С. 442–444.

724. *Захаров С. М.* Компьютерная трибология // Трение и износ. – 1993. – 14, № 1. – С. 98–106.

725. *Zechel R.* Realisierung von EDV-gestutzten Laboratoriums Informationssystemen // Tribol. und Schmierungstechn. – 1988. – 35, № 5. – S. 271–180.

726. *Дроздов Ю. Н., Сорокин Г. К., Стадников Д. Я.* Интеллектуальные системы оценки и прогнозирования ресурса машин // Трение и износ. – 1992. – 13, № 1. – С. 122–128.

727. *Злытарев В. А.* Информационные технологии – основа обновления российской промышленности // Вестн. машиностр. – 1998. – № 5. – С. 40–44.

728. *Чихос Х.* Трибометрия – систематизированная методика испытаний на трение и износ // Трение, износ и смазочные материалы: Труды междун. науч. конф., Ташкент, 22–26 мая 1985. – Т. 1. – М., 1985. – С. 461–474.

729. *Бабичев М. А.* К вопросу оценки температуры на поверхности трения при исследовании прирабатываемости металлов и сплавов // Трение и износ. – 1982. –3, № 1. – С. 43–50.

730. *Зиненко С. А., Карапетян С. С., Силин А. А.* Измерительная система для оценки температуры твердых кристаллических тел в зоне их контакта в процессе трения// Трение и износ. – 1982. – 3, № 4. – С. 649–654.

731. *Балакин В. А., Переверзева О. В.* Метрологические основы измерений нестационарных температурных полей при трении // Трение и износ. – 1993. – 14, № 6. – С. 1072–1081.

732. *Грудинина Н. П., Качанович Ю. Г., Чекан А. В.* Автоматизация измерения параметров микрогеометрии поверхностей // Трение и износ. – 1984. – 5, № 2. – С. 343–345.

733. *Купчинов Б. Б.* Экспресс-метод оценки микрогеометрии поверхностей твердых тел// Трение и износ. – 1994. – 15, № 4. – С. 720–724.
734. *Бенгтссон А., Ренберг А.* Получение топографического изображения поверхности с помощью профилографа // Трение и износ. – 1986. – 7, № 1. – С. 27–35.
735. Технические средства диагностирования: Справочник / Под общ. ред. *В. В. Клюева.* – М.: Машиностроение, 1989. – 636 с.
736. Diagnostyka maszyn: Zasady ogólne. Przyklady zastosowań / Red. *C. Cempel, F. Tomaszewski.* – Radom: MCNEMT, 1992. – 400 s.
737. *Чихос Х.* Подход к системному анализу трибологических повреждений // Трение и износ. – 1992. – 13, № 1. – С. 54–58.
738. Способ контроля изнашивания материалов при граничном трении: А. с. 1285347 СССР, МКИ G 01 N 3/ 56 / *И. И. Кривенко* и др. Заявл. 03.05.84; Опубл. в Бюлл. изобр., 1987, № 3.
739. *Кульков С. Н.* Применение фрактального подхода для триботехнического анализа// Трение и износ. – 1997. – 18, № 6. – С. 761–765.
740. Prufen mit Laserlicht // Werkstatt und Betr. – 1996. – 129, № 9. – S. 796.
741. Система контроля тормозов: Пат. 5372221 США, МКИ F 16 D 66/ 00 / Otis Elevator Co.; Заявл. 20.07.92; Опубл. 13.12.94.
742. Software predicts bearing performance // Pit and Quarry. – 1994. – 87, № 6. – P. 39–40.
743. *Пружанский Л. Ю.* Исследование методов испытаний на изнашивание. – М.: Наука, 1978. – 112 с.
744. Способ определения предельного износа фрикционной накладки: Заявка 7269617 Япония, МКИ F 16 D 66/ 02 / *М. Ямамото*; Заявл. 28.03.94; Опубл. 20.10.95.
745. Диагностирование дизелей / *Е. А. Никитин, Л. В. Станиславский, Э. А. Улановский* и др. – М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.
746. *Генкин М. Д., Соколова А. Г.* Виброакустическая диагностика машин и механизмов. – М.: Машиностроение, 1987. – 283 с.
747. Способ контроля технического состояния подшипника: А. с. 1312429 СССР, МКИ G 01 M 13/ 04 / *В. В. Воинов* и др.; Заявл. 16.09.85; Опубл. в Бюлл. Изобр. 1987, № 9.
748. *Маркова Л. В., Мышкин Н. К.* Диагностика трибосопряжений по частицам износа // Трение и износ. – 1988. – 9, № 6. – С. 1109–1117.
749. *Kuoppala R., Kuusisto E.* Voraussage von Maschinenschaden durch Analysen von Verschleißpartikeln sowie durch Schwingungsanalysen // Maschinenschaden. – 1987. – 60, № 1. – S. 11–15.
750. *Канарчук В. Е., Чигринец А. Д.* Бесконтактная тепловая диагностика машин. – М.: Машиностроение, 1987. – 158 с.
751. *Сорокин Г. М., Ковальский Б. И.* О связи механизма изнашивания с механохимическими процессами на фрикционном контакте в условиях граничной смазки // Трение и износ. – 1987. – 8, № 4. – С. 720–723.
752. Real-time evalution of wear particles using electromagnetic forced rotation and laser scattering / *T. Sato, O. Ikeda, T. Hatsuzawa, M. Linzer* // Wear. – 1987. – 115, № 3. – P. 273–284.
753. *Маркова Л. В., Кирпиченко Ю. Е., Холодилов О. В.* Портативный оптико-магнитный детектор и его использование для диагностики изнашивания // Трение и износ. – 1997. – 18, № 2. – С. 224–228.

754. *Постников В. И.* Исследование и контроль износа машин методом поверхностной активации. – М.: Атомиздат, 1973. – 168 с.
755. *Смушкович Б. Л.* Маятниковые силоизмерители в трибометрии. Применение и расчет // Трение и износ. – 1992. – 13, № 3. – С. 546–549.
756. Метод измерения момента трения в подшипниках скольжения и качения: Пат. 159926 РП, МКИ G 01 M 13/ 04 / *Z. Kusznierewicz, Z. Rymuza*; Politechnika Warszawska.; Заявл. 03.05.89; Опубл. 29.01.93.
757. Способ определения момента трения подшипников качения: А. с. 1500896 СССР, МКИ G 01 M 13/ 04/ *Ю. М. Вайткус* и др.; Заявл. 04.12.87; Опубл. 15.08.89 в Бюлл. изобр. № 30.
758. *Нестерова И. Н., Гусев А. Ф.* Микротрибометр – прибор для экспериментального исследования фрикционных параметров тонких поверхностных слоев и покрытий // Трение и износ. – 1995. – 16, № 6. – С. 1152–1158.
759. *Хрущов М. М.* Лабораторные методы испытания на изнашивание материалов зубчатых колес. – М.: Машиностроение, 1966. – 152 с.
760. *Будински К. Дж.* Испытания на износ // Трибология: Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ. – М.: Машиностроение; Нью-Йорк: Аллертон пресс, 1993. – С. 378–412.
761. *Szczerek M.* Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych. – Radom: Inst. Technol. Ekspl., 1996. – 244 s.
762. *Eyre T. S.* Tribology Methodology and Analytical Techniques // INTERTRIBO'93: Proc. – T. 3. – Bratislawa, Slowak Repablic, 1993. – P. 174–182.
763. *Хрущов М. М.* О рациональной постановке испытаний на износ: Дискуссия (*Щапов Н. П., Лоренц В. Ф., Зайцев А. К.*) // Заводск. лабор. – 1937. – 6, № 5. – С. 600–607; № 7. – С. 903–910.
764. *Хрущов М. М.* Развитие учения об износостойкости машин в советский период (1917– 1970) // Трение и износ. – 1998. – 19, № 1. – С. 124–136.
765. *Войтов В. А., Баздеркин В. А.* Универсальная машина трения // Трение и износ. – 1992. – 13, № 3. – С. 501–506.
766. *Браун Э. Д., Смушкович Б. Л.* Современные серийные машины трения // Трение и износ. – 1984. – 5, № 1. – С. 94–99.
767. *Голего Н. Л., Козаков В. А.* Схемы и динамические модели машин для триботехнических испытаний // Трение и износ. – 1980. – 1, № 2. – С. 334–340.
768. *Plint M. A., Alliston-Greiner A. F.* Extrieme pressure and antiwear properties of lubricants: a critical study of current test methods and suggestions for the future // Friction-Wear-Lubrication-Design. Theory and practice of tribology: Proc. 6th. Int. Congress on Tribology. EUROTRIB'93. Budapest-Hungary, 1993. – V. 2. – P. 118–136.
769. Расширение функциональных возможностей серийных машин трения / *Л. И.. Мамон, А. Н. Дудка, И. Н. Пистунов* и др. // Заводск. лабор. – 1989. – 55, № 3. – С. 61–64.
770. *Калинин А. А., Мельников В. Г., Колобов Ю. М.* Способ повышения чувствительности регистрирующего устройства машины трения СМТ-1 // Заводск. лабор. – 1989. – 55, № 4. – С. 105–106.
771. *Балакин В. А.* Трение и износ при высоких скоростях скольжения. – М.: Машиностроение, 1980. – 136 с.
772. Установка для испытания материалов, позволяющая одновременно прикла-

дывать различные нагрузки: Пат. 5425276 США, МКИ G 01 N 3/ 08 / *M. M. Gram, C. G. Larsen, Han-sheng Chen, J. Albright*; MTS Systems Corp.; Заявл. 26.10.93; Опубл. 20.06.95.

773. *Фрике Р. В., Аллен С.* Устройство для многократных ударных испытаний на изнашивание // Трение и износ. – 1996. – 17, № 1. – С. 80–84.
774. Установка для испытания материалов на трение и износ: А. с. 632039 СССР, МКИ G 01 N 3/ 56 / *В. А. Довгяло, С. В. Копылов, Ю. М. Плескачевский* и др.; ИММС АН БССР.; Заявл. 03.06.77; Опубл. в Бюлл. изобр. 1978, № 42.
775. *Гулянский Л. Г.* Установка трения для моделирования и испытания деталей типа плунжерных пар // Трение и износ. – 1992. – 13, № 2. – С. 383–387.
776. *Ткачев В. Н.* Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин. – М.: Машиностроение, 1971. – 264 с.
777. *Генкин М. Д., Рыжов М. А., Рыжов Н. М.* Повышение надежности тяжелонагруженных зубчатых передач. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
778. *Виноградов В. Н., Сорокин Г. М., Колокольников М. Г.* Абразивное изнашивание. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
779. Установка для испытания смазочных и конструкционных материалов: Пат. 160594 Польша, МКИ G 01 N 3/ 56 / *S. Koziol, M. Szczerek, W. Piekoszewski*; MCNEMT, Radom, PL.; Заявл. 28.11.89; Опубл. 31.03.93.
780. Измерительный комплект для контроля и диагностики трибомеханических систем / *Ю. В. Скорынин, Ю. К. Наследышев, С. Д. Лавровский* и др. // Трение и износ. – 1993. – 14, № 3. – С. 596–600.
781. *Бояджийский Г. А., Йорданов А. И.* Машина для трибологических испытаний // Заводск. лабор. – 1993. – 59, № 3. – С. 54–55.
782. *Сорокин Г. М.* Трибология на пороге XXI века // Вестн. машиностр. – 1998. – 19, № 5. – С. 3–6.
783. *Поляков А. А.* К вопросу о лабораторных испытаниях материалов узлов трения // Трение и износ. – 1990. – 11, № 4. – С. 668–674.
784. *Кончиц В. В., Кирпиченко Ю. Е., Короткевич С. В.* Температурные испытания граничных слоев с использованием метода контактного электросопротивления // Трение и износ. – 1996. – 17, № 4. – С. 513–526.
785. Способ оценки состояния пары трения: Пат. 2051368 Россия, МКИ G 01 N 3/ 56 / *О. В. Холодилов, Е. И. Островский, Т. Ф. Калмыкова*; ИММС АН РБ.; Заявл. 09.07.90; Опубл. 27.12.95, Бюлл. № 36.
786. *Тур А. А., Холодилов О. В.* Акустико-эмиссионная диагностика прирабатываемости подвижных сопряжений // Трение и износ. – 1987. – 8, № 3. – С. 546–549.
787. *Филатов С. В.* Акустическая эмиссия при абразивном изнашивании металлов // Трение и износ. – 1982. – 3, № 3. – С. 559–562.
788. *Евсеев Д. Г., Медведев Б. М., Григорьян Г. Г.* Акустико-эмиссионный контроль структурной неоднородности деталей узлов трения качения // Вестн. машиностр. – 1991. – № 3. – С. 11–14.
789. *Березняков А. И., Стадниченко В. Н.* О взаимосвязи характеристик акустического излучения поверхности трибосопряжения с трибологическими параметрами // Трение и износ. – 1998. – 19, № 3. – С. 312–317.
790. *Sandy J.* Monitoring and diagnostics for rolling element bearings // Sound and Vibr. – 1988. – 22, № 6. – P. 16–20.
791. *Birring A. S., Kwun H.* Ultrasonic measurement of wear // Tribol. Int. – 1989. – 22, № 1. – P. 33–37.

792. Вибрационное устройство для оценки состояния подшипников: Пат. 5350040 США, МКИ F 16 N 21/ 00; Заявл. 12.02.92; Опубл. 27.09.94.
793. *Беркович Е. С.* Развитие способа измерения износа деталей машин методом искусственных баз // Теоретические и прикладные задачи трения, износа и смазки машин. – М.: Наука, 1982. – С. 198–210.
794. *Шепельский Ю. Л.* Развитие метода искусственных баз для оценки износа поверхностей // Трение и износ. – 1988. – 9, № 2. – С. 247–255.
795. *Постников В. И., Гарбар И. Н.* Современное состояние и перспективы работ по контролю износа с применением поверхностной активации // Трение и износ. –1980. – 1, № 2. – С. 350–356.
796. Радиоиндикаторные исследования износостойкости деталей цилиндропоршневой группы дизеля при работе на водотопливных эмульсиях / *Г. Ф. Бенуа, Ю. А. Горбачев, К. Б. Карякин* и др. // Трение и износ. – 1990. – 11, № 5. – С. 871–877.
797. *Tazawa S.* Радиоизотопный метод измерения износа // J. Jap. Hydraul. and Pneum. Soc. – 1995. – 26, № 6. – С. 752–760.
798. Устройство для измерения радиального зазора в подшипниках качения: Заявка 3623976 ФРГ, МКИ G 01 M 13/ 04 / *E. Blum, J. Hulz*; SKF GmbH.; Заявл. 16.07.86; Опубл. 21.01.88.
799. *Путинцев С. В., Белоусов А. И.* Повышение эффективности лабораторных методов оценки триботехнических свойств конструкционных и смазочных материалов // Завод. лабор. – 1995. – 61, № 8. – С. 59–62.
800. ASTM Designation G77-83. Standard Practice for Ranking Resistance of Materials to sliding wear using block-on-ring wear test. – P. 451–467.
801. Метод и устройство для непрерывного контроля износа узлов трения: Заявка 3524101 ФРГ, МКИ G 01 D 21/ 00; G 01 D 5/ 26. Заявл. 05.07.85; Опубл. 08.01.87.
802. *Лебедева И. Л., Юхно Т. П., Марьяхина Е. И.* Динамика изнашивания твердых смазочных покрытий и особенности формирования структуры их поверхностного слоя при трении в вакууме // Трение и износ. – 1987. – 8, № 6. – С. 1060–1067.
803. *Антипов В. В.* Износ прецизионных деталей и нарушение характеристики топливной аппаратуры дизелей. – М.: Машиностроение, 1972. – 177 с.
804. Совершенствование измерения износа методом профилографирования / *Ф. Х. Бурумкулов, А. М. Осин, А. А. Хотенко, С. А. Поляков* // Трение и износ. –1991. – 12, № 4. – С. 697–703.
805. *Канарчук В. Е.* Определение износа автотракторных двигателей с помощью анализов проб картерного масла. – Львов: Изд-во при Львовск. ун-те, 1972. – 38 с.
806. *Соколов А. И., Тищенко Н. Т., Аметов В. А.* Оценка работоспособности машин по параметрам работающего масла: Учеб. пособие. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1991. – 200 с.
807. *Сорокин Г. М., Ковальский Б. И.* Применение прямого фотометрирования для оценки работоспособности моторных масел // Трение и износ. – 1984. – 5, № 6. –С. 978–982.
808. *Лансдаун А. Р.* Применение вращательного депозитора при анализе продуктов изнашивания // Трение и износ. – 1987. – 8, № 4. – С. 590–596.
809. Способ смазки: Заявка 62-159889 Япония, МКИ F 16 N 29/ 00 / *М. Иино, Т. Сакураи, А. Коидзуми*; Идэмицу косан к. к.; Эхара сэйсакусе к. к.; Заявл.

08.01.86; Опубл. 15.07.87.

810. *Вавилов В. П.* Тепловые методы неразрушающего контроля: Справочник. – М.: Машиностроение, 1991. – 240 с.

811. Устройство для контроля температуры подшипника: Пат. 286644 ФРГ, МКИ F 01 M 11/ 10 / *S. Neuling*; VEB Kompres. Bannewitz.; Заявл. 03.07.89; Опубл. 31.01.91.

812. A method for predicting connecting rod bearings reliability based on seizure and wear analysis / *K. Onogawa, M. Teramoto, S. Uchida, M. Toyoda* // SAE Techn. Pap. Ser., 1988, № 880568. – P. 1–12.

813. *Черский И. Н., Богатин О. Б., Спаростин Н. П.* Восстановление моментов трения в системе не смазываемых подшипников по замерам температур // Трение и износ. – 1986. – 7, № 5. – С. 878–887.

814. Способ определения частиц износа в смазочной среде подшипников скольжения: Пат. 267642 ГДР, МКИ G 01 N 29/ 00, G 01 N 33/ 26 / *A. Sturm, M. Bode, S. Uhlemann, R. Paul, B. Ditrich*; Technische Hochschule Zittan; Заявл. 03.09.85; Опубл. 10.05.89.

815. Ultradzwiekowa diagnostyka połączen ciernych / *R. Calikowski, Z. Oleksiak, S. Pytko, A. Skorupa.* – Warszawa: PWN, 1989. – 119 s.

816. *Wright G. J., Neale M. J.* Wear debris analysis as an integral component of machinery condition monitoring // J. S. Afr. Inst. Mining and Met. – 1987. – 87, № 8. –P. 253–260.

817. *Маркова Л. В., Семенюк М. С.* Основные тенденции разработок методов и встроенных устройств диагностики состояния трибосистем // Трение и износ. – 1996. – 17, № 3. – С. 365–370.

818. *Gadd P.* Wear debris evaluation // Cond. Monit. Mach. and Plant: Semin., London,6 June, 1985. London, 1985. – P. 1–3.

819. *Ригни Д.* Процессы изнашивания при трении скольжения // Трение и износ. – 1987. – 8, № 6. – С. 973–976.

820. *Wright R. L., Centers P. M.* An improved method of ferrographic quantitation // Wear. – 1989. – 129, № 2. – P. 285–292.

821. *Громаковский Д. Г., Логвинов Л. М., Отражий В. И.* Исследование параметров частиц износа, генерируемых в процессе трения // Трение и износ. – 1996. – 17, № 1. – С. 94–99.

822. *Anderson D. P., Bowen E. R., Bowen J. P.* Advances in wear particle analysis. –Burlington: Noval research Edition, 1979. – 543 p.

823. *Рафф А. В., Мышкин Н. К.* Трибологические характеристики композиционных модулированных покрытий никель–медь в условиях граничной смазки // Трение и износ. – 1987. – 8, № 5. – С. 798–804.

824. *Лернер Ю. Н.* Оценка деформации микровыступов и разрушения поверхностных пленок при предварительном смещении на основе измерений электрического сопротивления // Трение и износ. – 1986. – 7, № 4. – С. 686–694.

825. *Корндорф С. Ф., Подмастерьев К. В.* Об одном методе контроля качества подшипников качения // Надежность и контроль качества. – 1989, № 2. – С. 53–57.

826. *Мышкин Н. К.* К оценке температурной стойкости материалов и смазок электрическими методами // Трение и износ. – 1984. – 5, № 4. – С. 744–747.

827. Контроль состояния масляной пленки в работающем подшипнике качения: Заявка 87103053 междунар. PCT, МКИ F 16 C 19/ 52, G 01 M 13/ 04

/ *P. E. Walderyd*; Заявл. 06.11.85; Опубл. в РЖМаш. мат. 1988. 1.48.340П.

828. Индикатор износа тормозных накладок: Заявка 2149034 Великобритания, МКИ F 16 D 66/ 02 / *J. Barret*; Заявл. 12.11.83; Опубл. 05.06.85.

829. Устройство для контроля износа тормозных накладок: Заявка 468136 Швеция, МКИ F 16 D 66/ 02 / *D. Anderfors*; AB Volvo; Заявл. 28.11.90; Опубл. 09.11.92.

830. *Прокопенко А. К., Порохов В. С.* Устройство для непрерывной регистрации износа образцов на машине трения // Завод. лабор. – 1979. – 45, № 2. – С. 169–170.

831. Устройство для прецизионного измерения износа полимерных материалов / *Ю. Е. Кирпиченко, В. В. Невзоров, В. Л. Котов, Л. А. Пинчук* // Трение и износ. –1987. – 8, № 5. – С. 921–923.

832. Тормоз с индикатором износа: Пат. 5140932 США, МКИ G 01 D 21/ 00, F 16 D 68/ 02 / *N. I. Goldfein, F. J. Sonzala*; LGS Research Inc.; Заявл. 30.08.91; Опубл. 25.08.92.

833. Индикатор износа фрикционных накладок автомобильного тормоза: Заявка WO 93/ 20365 междунар. PCT, МКИ F 16 D 666/ 02 / *R. J. Prince*; Заявл. 27.03.92; Опубл. 14.10.93.

834. Способ диагностирования машины: А. с. 1354045 СССР, МКИ G 01 M 15/ 00 / *А. К. Соон*; Заявл. 11.12.84; Опубл. в Бюл. изобр. 1987, № 43.

835. *Маркова Л. В.* Проблемы магнитооптической диагностики изнашивания смазанных подвижных сопряжений // Трение и износ. – 1990. – 11, № 2. – С. 338–342.

836. *Шевеля В. В.* Реология износостойкости и совместимости пар трения // Трение и износ. – 1993. – 14, № 1. – С. 48–62.

837. *Коцаньда С.* Усталостное растрескивание металлов / Пер. с пол. – М.: Металлургия, 1990. – 622 с.

838. *Иванова В. С., Терентьев В. Ф.* Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 455 с.

839. *Почтенный Е. К.* Прогнозирование долговечности и диагностика усталости деталей машин. – Мн.: Наука и техника, 1983. – 246 с.

840. Метод обнаружения трещин в валах в процессе эксплуатации: Пат. 5479824 США, МКИ G 01 N 29/ 04 / *M. R. Torres*; General Electric Co.; Заявл. 21.12.93; Опубл. 02.01.96.

841. *Маркова Л. В., Холодилов О. В.* Экспресс-метод определения загрязненности моторных масел // Трение и износ. – 1988. – 9, № 1. – С. 155–158.

842. *Бобрышева С. Н., Маркова Л. В.* Диагностика смазочных свойств мезогенных веществ с помощью зондового метода // Трение и износ. – 1998. – 19, № 3. – С. 361–365.

843. Подавление помех при ультразвуковом контроле методом трехмерного фильтрования: Пат. 5471878 США, МКИ G 01 N 29/ 00 / *R. Y. Chiao, P. J. Howard*; General Electric Co.; Заявл. 27.09.93; Опубл. 05.12.95.

844. *Belin M., Martin J. M.* Triboscopy a new approach to surface degradations of thin films // Wear. – 1992. – 156, № 1. – P. 151–160.

845. *Колесниченко Л. Ф., Терехин Г. С.* Применение дилатометрического метода для исследования процессов, происходящих при трении металлических поверхностей// ФХММ. – 1967. – 3, № 4. – С. 474–477.

846. *Лисовский В. В., Свиридёнок А. И., Струк В. А.* О корреляции дилатационных и фрикционных характеристик полимерных материалов // ДАН

БССР. – 1977. –20, № 6. – С. 15–17.

847. *Сидоров А. И.* Основные принципы проектирования и конструирования машин. –М.: Макиз, 1929. – 428 с.

848. *Евдокимов Ю. А., Колесников В. И., Подрезов С. А.* Тепловая задача металлополимерных трибосопряжений. – Ростов-на-Дону: Изд-во ун-та, 1987. – 166 с.

849. *Чичинадзе А. В.* Расчет и исследование внешнего трения при торможении. – М.: Наука, 1967. – 232 с.

850. Богданович П. Н. Тепловые и деформационные процессы на фрикционном контакте как факторы изнашивания полимерных материалов: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.04. / Институт механики металлополимерных систем АН Беларуси. – Гомель, 1993. – 32 с.

851. *Ван Кревелен Д. В.* Свойства и химическое строение полимеров / Пер. с англ. –М.: Химия, 1976. – 416 с.

852. *Попов В. Л., Колубаев А. В.* Анализ механизмов формирования поверхностных слоев при трении // Трение и износ. – 1997. – 18, № 6. – С. 818–826.

853. *Чижик Е. Ф., Семенюк Е. А.* К модели разогрева полимерных покрытий в потоке абразивных частиц // Трение и износ. – 1985. – 6, № 5. – С. 950–952.

854. *Буяновский И. А., Гурский Б. Э.* Три стадии проявления температурной вспышки при трении // Трение и износ. – 1998. – 19, № 2. – С. 187–193.

855. *Евдокимова А. Н.* К вопросу определения температуры поверхности при высокоскоростном трении с учетом направленности сдвиговых деформаций // Трение и износ. – 1996. – 17, № 4. – С. 475–479.

856. *Колесников В. И.* Теплофизические процессы в металлополимерных трибосистемах и повышение их фрикционных характеристик: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.04. / Моск. ин-т нефти и газа им. И. М. Губкина. – Москва, 1987. – 44 с.

857. *Колесников В. И., Мясникова Н. А., Задороэкный А. И.* Акустическая диагностика трибосопряжений и пути повышения их износостойкости // Газ. промышленность. –1995. – № 8. – С. 35–37.

858. Тепловой режим твердых сплавов при трении с малыми коэффициентами взаимного перекрытия / *А. И. Филипчук, А. А. Рыжкин, А. В. Чичинадзе, А. Г. Гинзбург*// Трение и износ. – 1981. – 2, № 1. – С. 72–86.

859. *Лыков А. В.* Теория теплопроводности. – М.: Гос. изд-во техн.-теор. литры, 1952. – 392 с.

860. *Шлыков Ю. П., Генкин Е. А.* Теплопередача между соприкасающимися металлическими поверхностями. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 144 с.

861. *Балакин В. А.* Анализ условий возможности пренебрежения теплоотдачей в окружающую среду в процессе фрикционного нагрева тел // Трение и износ. – 1987. – 8, № 5. – С. 829–836.

862. *Земяньски К., Цапанидис Д.* Механизм возникновения катастрофического износа при сухом трении полиоксиметилена по поверхности стали // Трение и износ. – 1983. – 4, № 2. – С. 211–217.

863. Взаимосвязь характеристик температурного поля пары трения с интенсивностью изнашивания / *К. Г. Щучев, А. И. Филипчук, А. А. Рыжкин, М. М. Климов* // Трение и износ. – 1985. – 6, № 1. – С. 153–157.

864. *Пружанский Л. Ю.* Износ и тепловое расширение при трении // Трение и износ. – 1985. – 6, № 3. – С. 519–526.

865. *Богатин О. Б., Моров В. А., Тихонов А. Г.* Проблемы моделирования нестационарного термоконтактного взаимодействия в трибосистемах // Трение и износ. – 1992. – 13, № 1. – С. 172–184.
866. *Сенатрев А. Н., Невзоров В. В.* Количественное определение тепловыделения при трении металлополимерных пар методом дифференциальной калориметрии // Трение и износ. – 1986. – 7, № 4. – С. 726–728.
867. Исследование температурного поля узлов трения с тонкослойным полимерным покрытием / *Ю. А. Евдокимов, В. И. Колесников, С. А. Подрезов, В. Н. Сухобоченков* // Трение и износ. – 1983. – 4, № 6. – С. 1059–1065.
868. *Сысоев П. В., Богданович П. Н., Лизарев А. Д.* Деформация и износ полимеров при трении. – Мн.: Наука и техника, 1985. – 240 с.
869. *Ребиндер П. А., Куртель Р.* Обзорные доклады по теме: Взаимодействие поверхностей – адгезия и деформация поверхностных слоев при трении // Всесоюзный симпозиум о природе трения твердых тел. – Мн.: 1969. – С. 1–40.
870. *Хоникомб Р.* Пластическая деформация металлов / Пер. с англ. – М.: Мир, 1972. – 408 с.
871. *Бородай А. В., Коняхин Г. В.* Исследование некоторых закономерностей внешнего трения с помощью стержневой модели // Трение и износ. – 1987. – 8, № 6. – С. 1052–1059.
872. *Heilmann P., Clark W. A., Rigney D. A.* Orientation determination of subsurface cells generated by sliding // Acta Met. – 1983. – 31, № 8. – P. 1293–1305.
873. *Алехин В. П., Шоршоров М. Х.* Структурные и энергетические особенности кинетики микропластической деформации в приповерхностных слоях материалов // Трение и изнашивание при высоких температурах. – М.: Наука, 1973. – С. 39–44.
874. *Конева Н. А., Козлов Э. В.* Физическая природа стадийности пластической деформации // Изв. Вузов. Физика. – 1990. – № 2. – С. 89–106.
875. *Кузнецов Е. А., Гороховский Г. А.* Фрикционное взаимодействие шероховатых тел с позиций механики твердого тела // Трение и износ. – 1980. – 1, № 4. – С. 638–649.
876. *Розенберг Ю. А.* Влияние смазочных масел на долговечность и надежность деталей машин. – М.: Машиностроение, 1970. – 312 с.
877. *Obara S., Kato T.* Effect of thermal distortion on wear of composites // Trans. ASME J. Tribol. – 1995. – 117, № 4. – P. 622–628.
878. *Богданович П. Н.* Деформации и разрушение поверхностных слоев полимерного материала при трении // Трение и износ. – 1982. – 3, № 2. – С. 276–283.
879. Исследование структуры фрикционных материалов. – М.: Наука, 1972. – 131с.
880. *Гарбар И. И.* Кинетика развития дислокационной структуры меди в процессе трения // Трение и износ. – 1982. – 3, № 5. – С. 880–888.
881. *Гарбар И. И.* Фрагментация поверхностных слоев низкоуглеродистой стали и меди при усталостном и адгезионном изнашивании // Трение и износ. – 1986. – 7, № 6. – С. 1043–1053.
882. Определение критериев работоспособности материалов при высоких скоростях скольжения / *А. В. Чичинадзе, А. Г. Гинзбург, В. М. Горюнов* и др. // Трение и износ. – 1981. – 2, № 3. – С. 479–494.
883. *Лихтман В. И., Щукин Е. Д., Ребиндер П. А.* Физико-химическая механи-

ка металлов. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 304 с.
884. *Ханин М. В., Зайцев Г. П.* Изнашивание и разрушение полимерных композиционных материалов (системный подход). – М.: Химия, 1990. – 256 с.
885. *Шульц В. В.* Форма естественного износа деталей машин и инструмента. – Л.: Машиностроение, 1990. – 206 с.
886. *Карасик И. И.* Прирабатываемость материалов для подшипников скольжения. – М.: Наука, 1978. – 136 с.
887. *Buckley D. H., Rabinowicz E.* Fundamentals of the wear of hard materials // Sci. Hard Mater.: Proc. Int. Conf., Rhodes, 23–28 Sept., 1984. Bristol, Boston, 1986. – P. 825–849.
888. Влияние фрикционного нагрева на изнашивание композиционного материала с дисперсным контактным слоем / *В. Я. Прушак, А. Д. Зюзьков, П. Н. Богданович* и др. // Весці АН Беларусі. Серыя фіз.-тэхн. н. – 1997. – № 2. – С. 39–42.
889. *Кузнецов Е. А.* Распределение напряжений на поверхности неоднородного полупространства при давлении на него круглого штампа // Трение и износ. – 1984. – 5, № 6. – С. 1085–1094.
890. *Хрущов М. М.* Классификация условий и видов изнашивания деталей машин // Трение и износ в машинах. – М: Изд-во АН СССР. – 1953. – № 8. – С. 5–17.
891. *Икрамов У. А.* Расчетные методы оценки абразивного износа. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
892. *Кащеев В. Н.* Физико-механические процессы абразивного разрушения металлической поверхности // Трение и износ. – 1980. – 1, № 3. – С. 425–435.
893. *Лаврентьев А. И.* О связи абразивной износостойкости материалов с их физико-механическими свойствами // Трение и износ. – 1980. – 1, № 5. – С. 878–883.
894. *Ямпольский Г. Я.* Абразивный износ трущихся сопряжений машин // Трение и износ. – 1981. – 2, № 5. – С. 832–842.
895. *Брыков Н. Н.* Оценка износостойкости сталей при абразивном изнашивании // Трение и износ. – 1988. – 9, № 2. – С. 317–321.
896. *Сорокин Г. М., Сафонов Б. П.* Влияние механических характеристик сталей на их сопротивление абразивному изнашиванию // Трение и износ. – 1984. – 5, № 5. – С. 797–805.
897. *Поляков А. А., Гаркунов Д. Н.* Водород как ускоритель износа // Вестн. машиностр. – 1974. – № 6. – С. 59–62.
898. *Шпеньков Г. П.* Механизм водородного изнашивания тормозных устройств // Долговечность трущихся деталей машин; Вып. 5. – М.: Машиностроение, 1990. – С. 319–328.
899. *Марков Д. П.* Катастрофические виды изнашивания: заедание, задир, схватывание// Трение и износ. – 1998. – 19, № 3. – С. 331–343.
900. *Федоров С. В.* Термодинамические представления о процессе схватывания при трении без смазки // Трение и износ. – 1986. – 7, № 2. – С. 240–249.
901. *Рабинович Э.* Механизм схватывания при заедании // Трение и износ. – 1992. – 13, № 1. – С. 43–47.
902. *Suh N. P.* The Delamination Theory of Wear // Wear. – 1973. – № 1. – P. 111–124.
903. *Макушок Е. М., Калиновская Т. В., Белый А. В.* Массоперенос в процессах трения. – Мн.: Наука и техника, 1978. – 272 с.

904. *Уотерхауз Р. Б.* Фреттинг-коррозия / Пер. с англ. – Л.: Машиностроение, 1976. – 272 с.
905. *Погодаев Л. И., Шевченко П. А.* Гидроабразивный и кавитационный износ судового оборудования. – Л.: Судостроение, 1984. – 264 с.
906. *Козырев С. П.* Генезис кавитационного изнашивания // Трение и износ. – 1980. – 1, № 5. – С. 793–808.
907. *Прейс Г. А.* О природе коррозионно-механического изнашивания металлов // Трение и износ. – 1987. – 8, № 5. – С. 792–797.
908. *Лазарев Г. Е.* Механизм коррозионно-механического изнашивания // Трение и износ. – 1984. – 5, № 4. – С. 740–743.
909. *Костецкая Н. Б.* Механизмы деформирования, разрушения и образования частиц износа при механохимическом трении // Трение и износ. – 1990. – 11, № 1. – С. 108–115.
910. *Ludema K. C.* Classes of wear // Ind. and Eng. Chem. Prod. Res. and Develop. – 1980. – 19, № 3. – P. 335–337.
911. *Рамзаев А. П.* О связи показателя фрикционной усталости с прочностью твердых тел // Трение и износ. – 1984. – 5, № 2. – С. 355–359.
912. *Гарбар И. И.* Особенности изнашивания и границы применения сопряженных материалов трущихся пар. II. // Трение и износ. – 1984. – 5, № 4. – С. 704–712.
913. *Pool K. V., Dharan C. K. H., Finnie I.* Erosive wear of composite materials // Wear. –1986. – 107, № 1. – P. 1–12.
914. *Рыбников Ю. С., Круглова Л. В.* Основы электронной теории износа при трении // Вестн. машиностр. – 1989. – № 6. – С. 6–10.
915. *Алексеев Н. М., Добычин М. Н.* Модели изнашивания // Трибология: Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ. – М.: Машиностроение; Нью-Йорк: Аллертон пресс, 1993. – С. 66–87.
916. *Barber J. R.* The influence of thermal expansion on the friction and wear process // Wear. –1967. – 10, № 2. – P. 155–159.
917. *Гжиров Р. И.* Краткий справочник конструктора: Справочник. – Л.: Машиностроение, 1984. – 464 с.
918. *Егоренков Н. И., Истерин А. Н., Потеха В. Л.* Влияние кристаллизации на адгезию поликапроамида к металлу // Механика полимеров. – 1976. – № 1. – С. 170–172.
919. *Евдокимов Ю. А., Потеха В. Л.* Выбор оптимальных режимов формирования антифрикционных покрытий из порошковых полимеров // Известия Северо-Кавказского научного центра высшей школы. Сер. Технические науки. – 1981. – № 3. – С. 57–59.
920. *Евдокимов Ю. А., Потеха В. Л.* Исследование диффузионных процессов в металлополимерных узлах трения // Трение и износ. – 1982. – 3, № 3. – С. 478–483.
921. Эпиламирование деталей локомотивов / *В. Л. Потеха, А. В. Дубина, Ю. И. Милинкевич, В. А. Золоторенко, И. Е. Бутом, Л. В. Тупицын* // ЭТТ. – 1989. – № 1. – С. 28–29.
922. *Потеха В. Л., Суслов А. А.* Трибодиагностика высоконагруженных опор скольжения // Вест. машиностр. – 1989. – № 7. – С. 21–22.
923. *Потеха В. Л., Невзорова А. Б., Напреев И. С.* Эпиламирование деталей трения // ЭТТ. – 1990. – № 5. – С. 28.
924. Эпиламирование режущего инструмента / *В. Л. Потеха, И. С. Напреев,*

Л. М. Бондарук, В. А. Долонговский, И. В. Почекутов, Г. Г. Кондренко // ЭТТ. – 1990. – № 10. – С. 31.

925. *Potekha V. L., Szczerek M. M.* Metoda u urządzenie do precyzyjnego pomiaru zuzycia elementów węzlów tarcia // Zjawiska w strefie tarcia: Komunikaty, cz. II, XVIII Jesienna Szkola Tribologiczna, Kolobrzeg, 21–24 wrzesnia 1992 r, Radom, 1992. – S. 145–154.
926. *Потеха В. Л.* Триботехнологическая эффективность эпиламирования режущего инструмента и деталей машин // Трение и износ. – 1992. – 13, № 5. – С. 1070–1076.
927. *Szczerek M., Potekha V., Piekoszewski W.* Badanie cieplnozuzyciowych charakterystyk slizgowego skojarzenia stal-polimer // Tribologia. – 1993. – № 3. – S. 63–66.
928. *Потеха В. Л., Невзоров В. В., Щерек М. М.* Исследование термоизносных характеристик металлополимерных подшипников скольжения с прецизионной точностью // Трение и износ. – 1994. – 15, № 1. – С. 78–83.
929. *Potekha V., Piekoszewski W., Rogachev A., Szczerek M.* Wear mechanism of epilamen treated triboengineering elements // Tribologia.– 1996. – № 3. – S. 263–270.
930. *Потеха В. Л., Рогачев А. В., Щерек М. М., Пекошевски В. В.* Прецизионный контроль изнашивания узлов трения скольжения // Трение и износ. – 1996. – 17, № 5. – С. 637–643.
931. *Пекошевски В. В., Потеха В. Л., Щерек М. М., Вишневски М.* Системный анализ методологии трибологических испытаний конструкционных материалов // Трение и износ. – 1996. – 17, № 2. – С. 178–186.
932. *Потеха В. Л., Рогачев А. В., Напреев И. С.* Теоретико-экспериментальная оценка оптимальных условий эксплуатации эпиламированных трибосопряжений машин // Трение и износ. – 1996. – 17, № 6. – С. 764–768.
933. *Потеха В. Л., Щерек М. М., Холодилов О. В.* Трибодилатометрия: Основные термины и определения // Трение и износ. – 1997. – 18, № 1. – С. 121–124.
934. *Потеха В. Л.* Применение гармонического анализа в трибологических испытаниях материалов // Трение и износ. – 1997. – 18, № 5. – С. 687–693.
935. *Потеха В. Л., Напреев И. С.* Исследование особенностей физико-химических процессов в системе металл–покрытие эпилама // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.- тэхн. навук. – 1998. – № 1. – С. 21–24.
936. *Потеха В. Л., Петров С. В.* Метод дилатометрического контроля изнашивания материалов. – Завод. лабор. – 1998. – 64, № 8. – С. 52–55.
937. *Потеха В. Л., Напреев И. С.* Исследование триботехнических характеристик эпиламированных подшипников качения машин // Вестн. машиностр. – 1998. – № 5. – С. 16–18.
938. *Потеха В. Л., Петров С. В.* Гармонический анализ результатов трибологических испытаний резинометаллических сопряжений // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1998. – № 4. – С. 78–83.
939. *Шимановский А. О., Потеха В. Л., Петров С. В.* Расчет и экспериментальная проверка работоспособности устройства для оценки износостойкости деталей транспортных средств // Измерительная техника. – 1998. – № 8. – С. 33–35.
940. *Потеха В. Л.* Исследование свойств многокомпонентных антифрикционных покрытий на основе поликапроамида // Повышение надежности путевых и

строительных машин: Сб. ст. / Ростов. ин-т инженеров ж.-д. трансп. – Ростов-на-Дону, 1981. – Вып. 158. – С. 21–22.

941. *Потеха В. Л.* Моделирование и оптимизация технологических процессов ремонта железнодорожного подвижного состава // Оптимизация управления и повышение эффективности работы локомотивов: Сб. ст. – Гомель: БелИИЖТ, 1984. – С. 96–101.

942. *Потеха В. Л.* Триботехническая подготовка локомотиворемонтной технологии // Совершенствование управления и повышение эффективности работы энергетической цепи тепловоза: Сб. ст. – Гомель: БелИИЖТ, 1989. – С. 52–59.

943. Оптимизация условий эксплуатации покрытий эпилама / *В. Л. Потеха, С. С. Сидорский, А. В. Рогачев, И. С. Напреев, Ю. С. Бойко* // Сб. тр. Физика и технология тонкопленочных материалов. – Гомель: БелГУТ; Вып. 2. – 1994. – С. 21–28.

944. *Потеха В. Л., Петров С. В.* Трибологические характеристики модифицированных резинометаллических уплотнений железнодорожных транспортных средств // Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин: Тематич. сб.; Вып.3. – Новополоцк, 1997. – С. 154.

945. *Potekha V. L., Napreev I. S.* The application of epilam compositions for improvement of tribological characteristics of materials surface layers // INTERTRIBO'90: Proceedings. –sekcia F, 17–20 April 1990. – Vysoke Tatry, Ceskoslovensko, 1990. – S. 104.

946. Precision Control of Bearing Units Deterioration / *V. L. Potekha, M. M. Szczerek, W. W. Piekoszewski, V. V. Nevzorov, I. S. Napreev* // INTERTRIBO'93: Proceedings. –T. 2. – Bratislawa, 26–28 August 1993. – Bratislawa, 1993. – S. 154–157.

947. *Пекошевски В. В., Потеха В. Л., Щерек М. М.* Основные направления совершенствования оборудования для трибологических испытаний материалов // Анализ и рациональное использование трибообъектов: материалы междунар. науч.-практ. семинара ТРИБОЛОГ-10М – SLAVYANTRIBO-1. – Рыбинск–Москва, 1993. – С. 17–22.

948. *Потеха В. Л., Напреев И. С., Петров С. В.* Термодиагностирование трибосопряжений транспортной техники // Современные проблемы машиноведения: Материалы междунар. конф., Гомель, 1–3 июня 1996 г. – Гомель: Гомельск. политехн. ин-т, 1996. – С. 86–87.

949. *Потеха В. Л.* Методологические основы трибодилатометрии и ее практические приложения // Современные проблемы машиноведения: Материалы междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 1–3 июля 1998 г. – Гомель: Гомельск. политехн. ин-т, 1998. – С. 161–162.

950. *Потеха В. Л., Напреев И. С., Перхунова Л. А.* Влияние температурно-временных режимов формирования покрытий эпилама на энергетические характеристики металлических поверхностей // Современные проблемы машиноведения: Материалы междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 1–3 июля 1998 г. – Гомель: Гомельск. политехн. ин-т, 1998. – С. 162–163.

951. *Евдокимов Ю. А., Потеха В. Л.* Особенности физико-химического взаимодействия в металлополимерных системах // Влияние среды на взаимодействие твердых тел при трении: Тез. докл. Всес. науч.-техн. конф., 20–22 мая 1981 г. – Днепропетровск, 1981. – С. 39–40.

952. *Потеха В. Л., Сенатрев А. Н.* Новый метод оценки теплостойкости полимерных материалов // Исследование, переработка и применение полимерных материалов: Тез. докл. науч.-техн. конф., Ижевск, 19–21 октября 1982 г. – Ижевск, 1982. – С. 6–7.

953. *Евдокимов Ю. А., Потеха В. Л., Харитонов В. В.* Особенности высокотемпературного взаимодействия в металлополимерных системах // X Юбилейный Всесоюзный симпозиум по механоэмиссии и механохимии твердых тел: Тез. докл. – Ростов-на-Дону, 24–26 сентября 1986 г. – М., 1986. – С. 175.

954. *Потеха В. Л., Напреев И. С.* Контактная тепловая диагностика подшипников скольжения машин // Оптический, радиоволновой и тепловой методы неразрушающего контроля: Тез. докл. Всес. науч.-техн. конф., Могилев, 23–25 мая 1989 г. –Могилев, 1989. – С. 134–135.

955. *Потеха В. Л., Ляшенко В. Ф., Напреев И. С., Суслов А. А.* Информационно-техническое обеспечение микропроцессорных трибодиагностических систем локомотивов // Микропроцессорные системы и устройства управления ответственными технологическими процессами на транспорте: Тез. докл. Всес. науч.- техн. конф., Москва, 15–19 ноября 1989 г. – Москва, 1989. – С. 34–35.

956. *Потеха В. Л., Напреев И. С., Суслов А. А.* Материаловедческие вопросы создания диагностируемых металлополимерных подшипников скольжения // Физика и механика композиционных материалов на основе полимеров: Тез. докл. науч.-техн. конф. – Гомель, 1989. – С.17.

957. *Рогачев А. В., Потеха В. Л., Щербаков С. В., Серенков А. Г.* Триботехнологические свойства поверхностно модифицированных резиновых уплотнений // РЕМОНТ'90. Программа-резюме. Вторая междунар. конф., 3–5 октября 1990 г. – Болгария, Албена, 1990. – С. 51–52.

958. *Potekha V. L., Nevzorov V. V., Scherek M. M.* High Precision Analysis of Temperature Induced Behaviour of Metal-Polymeric Sliding Bearings // New materials and technologies in tribology: The Joint Soviet-American conference with international participation. 06–09 October 1992. – Minsk, 1992. – S. 205–206.

959. Устройство для прецизионного контроля изнашивания тонких поверхностных слоев материалов / *В. Л. Потеха, М. М. Щерек, В. Пекошевски, В. В. Невзоров, И. С. Напреев* // Физика и технология тонкопленочных полимерных систем: Тез. докл. науч.-техн. конф., Пружаны, 26–28 мая 1993 г. – Гомель, 1993. – С. 112–114.

960. *Пекошевски В. В., Потеха В. Л., Щерек М. М.* Системный анализ методологии трибологических испытаний конструкционных материалов // Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии: Тез. докл. науч.-техн. конф., Гродно, 28–30 июня 1994 г. – Гродно, 1994. – С. 85–86.

961. *Потеха В. Л., Невзоров В. В., Напреев И. С.* Метод непрерывного прецизионного контроля изнашивания деталей узлов трения // Проблемы качества и надежности машин: Тез. докл. науч.-техн. конф., Могилев, 4–5 октября 1994 г., Ч. 1. – Могилев: Могилевск. машиностр. ин-т, 1994. – С. 123.

962. *Потеха В. Л., Петров С. В.* Методика дилатометрического контроля трибосистем // Надежность и безопасность технических систем: Тез. докл. междунар. науч.- техн. конф., Минск, 28–29 октября 1997 г. – Минск, 1997. – С. 110–112.

963. Устройство для диагностики линейного износа трибомеханических систем

«ТРИБАН»: ТУ РБ 14438964.002-95. № 001904 от 19.04.95.

964. А. с. 567997 СССР, МКИ G 01 N 3/ 40. Способ определения зависимости твердости образца от температуры / *Н. И. Егоренков, Д. Г. Лин, В. Л. Потеха* (СССР). –№ 2193292/ 28; Заявл. 26.11.75; Опубл. 05.08.77, Бюл. № 29.

965. А. с. 802845 СССР, МКИ G 01 N 19/ 04, G 01 N 25/ 02. Устройство для определения теплостойкости полимерных материалов / В. Л. Потеха (СССР). – № 2724867/ 18-25; Заявл. 01.02.79; Опубл. 07.02.81, Бюл. № 5.

966. А. с. 1000862 СССР, МКИ G 01 N 19/ 04. Устройство для определения теплостойкости полимерных материалов / *В. Л. Потеха, А. Н. Сенатрев* (СССР). – № 3337558/ 18-25; Заявл. 23.10.81; Опубл. 28.02.83; Бюл. № 8.

967. А. с. 1323777 СССР, МКИ F 16 C 17/ 24. Подшипник скольжения с устройством для определения износа / *В. Л. Потеха, И. С. Напреев, А. А. Суслов, Э. Э. Чернявская* (СССР). – № 3974996/ 27; Заявл. 14.11.85; Опубл. 15.07.87, Бюл. № 26.

968. А. с. 1388761 СССР, МКИ G 01 N 3/ 56. Устройство для контроля величины износа материала / *В. Л. Потеха, И. С. Напреев, В. С. Старовойтов, А. А. Суслов* (СССР). – № 3988459/ 25-28; Заявл. 12.12.85; Опубл. 15.04.88, Бюл. № 14.

969. А. с. 1469310 СССР, МКИ G 01 N 3/ 56. Машина трения для испытания материалов / *В. Л. Потеха, Н. Г. Донченко, В. И. Колесников, Д. Н. Любимов* (СССР). –№ 4312495/ 25-28; Заявл. 23.06.87; Опубл. 30.03.89, Бюл. № 12.

970. А. с. 1482180 СССР, МКИ C 10 M 107/ 30 // (C 10 M 107/ 30, 143:04, 143:02) C 10 N 40:10. Приработочный состав / *В. Л. Потеха* (СССР). – № 4220666/ 23- 04; Заявл. 30.03.87.

971. А. с. 1490587 СССР, МКИ G 01 N 3/ 56. Способ определения величины износа материала / *В. Л. Потеха, В. Ф. Ляшенко* (СССР). – № 4279799; Заявл. 07.07.87; Опубл. 30.06.89, Бюл. № 24.

972. А. с. 1655581 СССР, МКИ G 05 B 6/ 02. Диагностическая система / *В. Л. Потеха, И. С. Напреев, А. А. Суслов, В. Ф. Ляшенко* (СССР). – № 4629746/ 27; Заявл. 02.01.89; Опубл. 15.06.91, Бюл. № 22.

973. А. с. 1688545 СССР, МКИ B 61 F 15/ 02. Способ повышения ресурса моторно-осевого узла локомотива / *В. Л. Потеха, И. С. Напреев, В. Г. Гавриш, Е. Л. Райтман* (СССР). – № 4717621/ 11; Заявл. 11.07.89.

974. А. с. 1732021 СССР, МКИ F 16 C 17/ 24. Подшипник скольжения с устройством для определения износа / *В. Л. Потеха, Н. Т. Гавриш* (СССР). – № 4776977; Заявл. 02.10.90; Опубл. 07.05.92, Бюл. № 17.

975. А. с. 1751504 СССР, МКИ F 16 C 33/ 10. Способ обработки пористого материала преимущественно для трибомеханической системы / *В. Л. Потеха, И. С. Напреев, Л. М. Бондарук* (СССР). – № 4837811/ 27; Заявлено 11.06.90; Опубл. 30.07.92, Бюл. № 28.

976. Zgloszenie patentowe № P 296225. Urządzenie do pomiaru liniowego żuzycia skojarzen trących / *V. Nievzorov, W. Piekoszewski, V. Potekha, M. Szczerek* (RP). Zajaw. 12.10.92.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Виды изнашивания 103
– Абразивное 103
– Адгезионное 105
– Водородное 107
– Деформационное 108
– Кавитационное 115
– Коррозионно-механическое 116
– Окислительное 117
– При заедании 109
– При фреттинг-коррозии 113
– Расслаиванием 112
– Усталостное 120
– Эрозионное 122

Гармонический анализ 211
– Оптимальное число гармоник 220
– Форма представления 211

Деформация трибосистем 93
– Влияние нагрузки 151
– Методы управления 100
– Пластическая 94

Диагностика
– Изнашивания 69
– Перспективы 80
– Потерь энергии 66
– Узлов трения 59
– Усталостных повреждений 80

Диагностическая система 276

Дилатация
– Металлических трибосистем 189
– Металлополимерных т рибосистем 201
– Связь с износом 192
– Эпиламированных трибосистем 237

Диффузия металла 223–230

Долговечность покрытий 245

Изнашивание
– Металлических трибосистем 189
– – Сталь – сталь 189
– – Сталь – бронза 191
– – Особенности 196
– Металлополимерных трибосистем 201
– – Монолитных деталей 201
– – Полимерных покрытий 205
– Эпиламированных узлов 237
– – Трения скольжения 246–246
– – Трения качения 247–251

Износ
– Зависимость от амплитуды циклов 217
– Циклический 212, 215

Испытания
– Без демонтажа 151
– Высокоточные 147
– Карта методики 169
– После демонтажа трибосистемы 151
– При переменной влажности среды 153
– Ресурсные 141, 144
– Стандартные 165, 167
– Циклические 139, 142

Источники погрешностей измерений 156, 159

Исследования
– Колебательных процессов 18
– Общенаучных проблем трибологии 16
– Переноса материалов 16
– Совместимости трущихся поверхностей 15
– Физико – химических процессов 17
– Электрических явлений 16

Корреляция термоизносной и фрикционной характеристик 218

Коэффициент
– Диффузии 226
– Корреляции 213, 214, 218
– Трансформации 149, 150, 194

Критерий температурный 270

Метод
– ДТА 261, 262
– Корреляционных квадратов 217, 218
– Планирования экспериментов 226, 239
– Полярографический 223
– Рентгеноструктурного анализа 207, 208

Методы оценки износа 71
– Акустико-эмиссионные 71
– Виброакустические 71
– Искусственных баз 72
– Микрометрирования 73
– Оптические 75
– Перспективы 80
– Поверхностной активации 73
– По потере массы 75
– По следу изнашивания 74
– Профилографирование 75
– Спектральные 76
– Термодиагностирование 77
– Ультразвуковые 77
– Феррография 78
– Электрофизические 79

Моделирование – 19

Модель
– Измерительной системы 155
– Скользящей поверхности 87
– Структуры фрикционного контакта 221
– Узла трения 134, 135

Нанотрибология – 20

Наследственность
– Технологическая и эксплуатационная 44, 148

Оборудование для испытаний 163

Параметры диагностирования 59
– Акустические 64
– Атомной физики 65
– Геометрические 63
– Излучений 69
– Кинематические 61
– Механические и молекулярные 64
– Статические и динамические 64
– Тепловые 64
– Универсальных физических постоянных 66
– Электрические и магнитные 65

Поверхностная энергия
– В разных точках термоизносной характеристики 234
– Резинового элемента трибосистемы 232
– Связь с амплитудой циклов 232, 235

Распределение тепла в элементах трибосистемы 90

Система трибологических испытаний 170

Скорость изнашивания 211, 256

Статистическая обработка 153
– Алгоритм 154
– Виды и источники погрешностей 159
– Данных эксперимента 160

Температура поверхности трения 91

Температурные вспышки 85

Тепловое расширение 84

Термоизносная характеристика
– Термин 130
– Трибосопряжений 128, 139, 140, 141 и др.

Трибоанализ
– Итоги исследований 14
– Перспективы 19

Трибоанализатор
– Термин 130
– Конструкция 180

Трибодилатометр 177
– Блоксхема настройки 186
– Схема PCLW – 01 180
– Термин 130
– Точность измерений 187
– Упрощенная схема 182
– Характеристики 181

Трибодилатометрия
– Методологические основы 125
– Методология исследований 131
– Перспективы 284
– Состояние 273
– Терминология 128, 131

Трибоинформатика 53
– Компьютерные базы данных 54
– Общие вопросы 53
– Перспективы 55
– Трибологическое образование 54
– Экспертные системы 54

Трибологическая система
– Схема 164

Трибологические испытания
– Анализ и систематизация 163

Трибология
– Направления исследований 14

Трибоматериаловедение 20
– Керамические материалы 28
– Металлы 21
– Перспективы 35
– Полимерные композиты 23
– Смазочные материалы 29
– Углеграфитовые материалы 28

Трибомониторинг 56
– Трибометрия 56
– Трибодиагностика 58

Триботестеры 172
– Схемы узлов трения 173
– Характеристики 172–177

Триботехника 35
– Валы и оси 42
– Зубчатые соединения 39
– Колесо-дорожное покрытие 42
– Кулачковый механизм 41
– Общие вопросы 36
– Пара винт – гайка 41

– Подшипники качения 37
– Подшипники скольжения 37
– Прессовые соединения 39
– Резьбовые соединения 38
– Ременные передачи 40
– Сопряжение цилиндр – поршень 38
– Тенденции развития 43
– Уплотнения 41
– Шарнирные соединения 42
– Шлицевые соединения 40
– Электрические контакты 39

Триботехнология 43
– Заливка жидким металлом 45
– Ионно-лучевая обработка 50
– Лазерные технологии 48
– Магнитные технологии 52
– Механическая обработка 46
– Наплавка 49
– Плазменные технологии 51
– Перспективы 52
– Пластинирование 44
– Пластическое деформирование 51
– Применение полимеров 47
– Термическая обработка 51
– ФАБО 45
– Химико-термическая обработка 48
– Электрохимические технологии 46
– Электроэрозионная обработка 49
– Эпиламирование 47

Тригонометрические многочлены 212–214, 216, 217, 257, 258

Узел трения
– Модельный 134, 135
– С устройством для измерения износа 274, 277

Уравнение
– Аррениуса 229
– Для расчета поверхностной энергии 231

Усталостные повреждения 80

Устройство
– поддерживающее – 231
– для измерения поверхностной теплостойкости 232

Физико – химические процессы
– В металлополимерных системах 185
– В эпиламированных узлах трения 216

Характеристики
– Амплитудные 177, 180, 214
– Временные 178, 181, 215

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Авдеев Д. Т. 21
Авитцур Б. 19
Адам Н. К. 47
Айнбиндер С. Б. 17, 21
Айсс Н. С. (мл) 21
Александров М. П. 83
Алексеев Н. М. 15, 220
Альберти Д. 43
Анциферов В. Н. 21
Арзамасов Б. Н. 44
Архимед 39
Арчард Дж. Дж. 83, 87, 101, 106
Ахвердиев К. С. 36
Ахматов А. С. 17, 47

Б

Бакли Д. 17
Балакин В. А. 19, 57, 83
Баркен М. 18
Бартенев Г. М. 19
Барц В. 54
Белый А. В. 16, 44
Белый В. А. 15, 16, 17, 19, 21, 23, 36, 44, 57, 154
Бенардос Н. Н. 50
Бенгтссон А. 57
Беркович Е. С. 72
Берлин А. А. 21
Берлин Ю. А. 16
Бершадский Л. И. 16
Билик Ш. М. 16
Биллитт М. 21
Блоджет К. Б. 47
Блок Г. 83, 111
Богатин О. Б. 36
Богданович П. Н. 21, 83
Бойцов А. Г. 44
Болотов А. Н. 36
Бородай А. В. 19
Бородин И. Н. 44
Боуден Ф. П. 18, 67, 69, 83
Браун Э. Д. 19, 21, 69, 83
Буря А. И. 24
Буфеев В. А. 19
Буше Н. А. 15, 19, 21, 83, 111, 220

В

Вадас Э. 44
Васильев Ю. Н. 21
Ведемейер Дж. 19
Великовский Д. С. 30
Виноградов В. Н. 83
Виноградова И. Э. 19
Власов В. М. 59
Войтов В. А. 19
Воронков Б. Д. 36
Воскресенский В. А. 36
Врублевская В. И. 21

Г

Гаевик Д. Т. 36
Галахов М. А. 36
Гамуля Г. Д. 53
Гарди Дж. 47
Гаркунов Д. Н. 17, 23, 36, 45, 83, 107
Геккер Ф. Р. 18
Генкин М. Д. 59
Годе М. 20
Голего Н. Л. 44
Гольдаде В. А. 16, 21
Горленко О. А. 44
Гороховский Г. А. 17
Горячева И. Г. 36
Гриб В. В. 20, 36, 57

Грибова И. А. 17, 21
Григорьянц А. Г. 44
Гриффитс Б. Дж. 57
Гришко В. А. 36
Грозин Б. Д. 109
Громаковский Д. Г. 16
Гук Р. 42
Гуляев А. П. 52

Д

Давыдов А. П. 36
Дево Х. 47
Демкин Н. Б. 36, 57
Дерягин Б. В. 16, 17, 47
Джонсон К. Л. 15
Джост П. 9, 14, 53
Добычин М. Н. 36, 220
Довгяло В. А. 44
Докучаева Е. Н. 53
Дорожкин Н. Н. 44
Дроздов Ю. Н. 20, 21, 33, 83, 112
Дроздович В. Н. 36
Дубинин А. Д. 16

Е

Евдокимов Б. Д. 16
Евдокимов Ю. А. 16, 17, 20, 21, 36, 83

Ж

Жарин А. Л. 53
Жеглов О. С. 19

З

Загавура Ф. Я. 57
Зайцев А. К. 69
Запорожец В. В. 16, 57
Заславский Р. Н. 21
Заславский Ю. С. 21, 24
Захаров С. М. 20, 36, 53
Зозуля В. Д. 21
Зум Г. К. Х. 20

И

Ивата С. 53
Икрамов У. А. 83
Иоффе А.Ф. 100
Ишлинский А. Ю. 15, 18
Ищук Ю. Л. 21

Й

Йенеманн Х. 57

К

Кайдановский Н. Л. 19
Камерон А. 69
Канарчук В. Е. 59
Карасик И. И. 20, 83
Карлссон Л. А. 24
Карпе С. А. 17
Катафучи Т. 16
Като Т. 83
Кащеев В. Н. 69, 83
Кеглин Б. Г. 20
Кенько В. М. 53
Кестельман В. Н. 44
Кецке Х. Дж. 17
Кирпиченко Ю. Е. 53
Кламанн Д. 21
Кларк Д. Б. 17
Клаус Е. Е. 17
Климов К. И. 21
Климович А. Ф. 16
Клюев В. В. 59
Коднир Д. С. 36
Колесников В. И. 16, 17, 20, 59, 83
Колесников К. С. 44
Колесниченко Л. Ф. 83
Комбалов В. С. 36, 57
Конвисаров Д. В. 19
Кордонский Х. Б. 36
Коровчинский М. В. 36
Коршак В. В. 17, 21, 24
Костецкий Б. И. 16, 17, 19, 69, 83
Котелевский В. Ю. 18
Кохлхаас Г. 53
Крагельский И. В. 15, 17, 18, 19, 23, 36, 45, 57, 69, 83, 122
Краснов А. П. 17, 21, 24
Крыжановский В. К. 21
Крысов С. В. 19

Кудинов В. А. 18
Кужаров А. С. 16, 17, 19, 21
Кузнецов В. Д. 69
Кузнецов Н. Д. 44
Кулиев А. М. 21
Купчинов Б. И. 21, 36, 44
Кутьков А. А. 21

Л

Лазаренко Б. Р. 49
Лазаренко Н. И. 49
Лансдаун А. Р. 59
Ларсен - Бассе Дж. 17
Лашхи В. Л. 21
Левински А. 18
Ленкевич В. 18
Леонардо да Винчи 36, 37, 41, 53
Лешек В. 59
Ли Л. Х. 17
Лиде Д. Р. 53
Липатов Ю. С. 24
Лэнгмюр И. 47

М

Мадалинов Б. А. 19
Маркова Л. В. 59
Марчак Р. 19
Марюта А. Н. 18
Матвеевский Р. М. 21
Миронов В. С. 16
Михин Н. М. 36
Можис Д. 18
Моисеев В. Я. 73
Молодык Н. В. 44
Мроз В. 16
Мур Д. 36, 57
Мышкин Н. К. 16, 20, 21, 44, 57, 59

Н

Назаренко П. В. 16
Невзоров В. В. 59
Неверов А. С. 44
Невчак А. 19
Норосе С. 17
Носовский И. Г. 16

О

Одинг И. А. 94
Олейник Н. В. 44
Орлов Д. В. 21

П

Павлов В. Г. 33
Пекошевски В. В. 57
Пенкин Н. С. 83
Перевознюк В. А. 19
Песецкий С. С. 21
Петров В. В. 50
Петроковец М. И. 20, 36, 57
Пинчук В. Г. 19
Пинчук Л. С. 16, 21, 36, 83
Пинчук Р. Г. 19
Плескачевский Ю. М. 17, 21, 44
Плинт М. А. 69
Погосян А. К. 16, 18, 21, 24
Подольский М. Е. 36
Полевой С. Н. 44
Польцер Г. 20
Поляков А. А. 19, 107
Постников В. И. 73
Постников С. Н. 16
Пратт Дж. С. 21
Проников А. С. 59
Протасов Б. В. 83
Пружанский Л. Ю. 59, 83
Пытко С. 18, 24

Р

Радин Ю. А. 21
Рафф А. В. 83
Рац А. 20
Ребиндер П. А. 17, 47
Ремизов Д. Д. 24
Ригни Д. А. 17, 83
Ридлер К. 83
Римуза З. 24
Рогачев А. В. 17, 20, 44
Рогульскис К. М. 59
Родненков В. Г. 17, 21
Родченко Д. А. 44
Рудзит Я. А. 57

Рыжкин А. А. 83
Рыжов Э. В. 44, 57

С

Савкин В. Г. 17, 21, 57, 83
Сасада Т. 119
Свириденок А. И. 15, 16, 17, 18, 20, 21, 36, 44, 57, 59, 83, 154
Семенов А. П. 16, 21
Скорынин Ю. В. 20, 44
Славянов Н. Г. 50
Смуругов В. А. 17, 18
Смушкович Б. Л. 69
Сода Н. 119
Соколов А. И. 59
Сорокин Г. М. 83
Струк В. А. 17, 21
Су Н. П. 19, 56, 112
Сулима А. М. 44
Суслов А. Г. 44
Сысоев П. В. 21, 36, 44, 83

Т

Такано Н. 16
Тененбаум М. М. 83, 104
Тимкен Г. 37
Тищенко Н. Т. 59
Толстой Д. М. 18
Томашевский Ф. 59
Томсон Э. 39
Точильников Д. Г. 73
Турриано Х. 42
Тэйбор Д. 57, 69

Ф

Фальц Э. 36
Федоров В. В. 83
Федорченко И. М. 21
Флейшнер Г. 83
Френкель Я. И. 120
Фридрих К. 24
Фриз Дж. Р. 53
Фукс Г. И. 21
Фуут С. В. 36

Х

Хайкин С. Э. 19
Харач Г. М. 36
Хейнке Г 166
Холодилов О. В. 17, 53, 59
Хольм Р. 83
Хрущов М. М. 19, 52, 69, 72, 102, 104

Ц

Цемпела Ч. 59

Ч

Чебышев П. Л. 42
Черский И. Н. 24, 83
Чижик С. А. 20, 57
Чихос Х. 36, 57, 164
Чичинадзе А. В. 20, 21, 69, 83
Чудаков Е. А. 83

Ш

Шаповалов В. В. 59
Шейфер А. О. 53
Шнейдер Ю. Г. 44
Шпеньков Г. П. 17
Шульц В. В. 83
Шчерек М. М. 57, 69, 71

Щ

Щедров В. С. 69, 83

Э

Эйлер Л. 115
Эренфест П. С. 100

Ю

Юркевич О. Р. 44

Я

Янецкий Я. 24, 44
Яханмир С. 56
Ящерицын П. И. 44

Научное издание

ПОТЕХА Валентин Леонидович

ТРИБОДИЛАТОМЕТРИЯ

Редактор: Теплякова Л. Ф.

Компьютерная верстка: Потеха А. В.,
Камелицкий В. В.

Подписано в печать 01.12.2000
Формат 60x84 $^{1}/_{16}$. Гарнитура «Таймс». Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 19,5. Уч. -изд. л. 15,6
Тираж 125 экз. Заказ № 79

Отпечатано на ризографе ГГТУ им. П. О. Сухого, г. Гомель,
пр. Октября, 48.
Лицензия ЛВ № 399 от 14.07.99. Лицензия ЛП № 114 от 01.07.99

ISBN 985-6514-81-9

9 789856 514817 >