

Содержание

| | | |
|-----------------|---|----|
| | Введение | 5 |
| Глава 1. | Фундаментальные открытия в трибологии на основе самоорганизации (Гаркунов Д.Н.) | 9 |
| Глава 2. | Механизм эффекта безызносности и его закономерности (Гаркунов Д.Н., Мельников Э.Л., Щедрин А.В.) | 15 |
| 2.1. | Решение проблем трибологии, поставленных видными учеными в середине 60–70-х гг. XX века. Безызносное трение | 15 |
| 2.2. | Первоначальные сведения о самоорганизации в узлах трения | 22 |
| 2.3. | Безызносность в узлах трения компрессора холодильника | 25 |
| 2.4. | Механизм образования сервовитной пленки | 27 |
| 2.5. | Постулаты классической (коммунальной) трибологии и натуртрибологии | 33 |
| 2.5.1. | Классическая (коммунальная) трибология | 33 |
| 2.5.2. | Понятие о натуртрибологии (самоорганизации в узлах трения) | 35 |
| 2.6. | Научные дисциплины, явления, термины и понятия, необходимые при изучении эффекта избирательного переноса | 37 |
| 2.6.1. | Энтропия | 38 |
| 2.6.2. | Синергетика | 38 |
| 2.6.3. | Избирательный перенос при трении (эффект безызносности) | 39 |
| 2.6.4. | Вакансионно–дислокационный механизм при избирательном переносе | 40 |
| 2.6.5. | Конфигурационная энтропия металла | 40 |
| 2.6.6. | Линейные и нелинейные системы | 40 |
| 2.6.7. | Переползание дислокаций | 41 |
| 2.6.8. | Трибо-ПАВ | 42 |
| 2.6.9. | Диссипативная система | 42 |
| 2.6.10. | Диссипативная структура | 42 |
| 2.6.11. | Условия возникновения диссипативной структуры | 42 |
| 2.6.12. | Неравновесность системы | 43 |
| 2.6.13. | Кооперативные явления в системе | 44 |
| 2.6.14. | Лиганды, комплексные соединения, координационная теория | 44 |
| 2.6.15. | Открытая система избирательного переноса | 44 |
| 2.6.16. | Сервовитная пленка | 45 |
| 2.6.17. | Серфинг-пленка | 45 |
| 2.6.18. | Металлоплакирующий смазочный материал | 45 |
| 2.6.19. | Понятие о финишной антифрикционной безабразивной обработке | 46 |

| | | |
|-----------------|---|-----------|
| 2.6.20. | Континуальное трение | 46 |
| 2.6.21. | Бифуркация | 47 |
| 2.7. | Структура сервовитной пленки | 47 |
| 2.7.1. | Исследования на электронном микроскопе | 48 |
| 2.7.2. | Рентгеноструктурный анализ | 48 |
| 2.8. | Физические основы (факторы) эффекта безызносности (избирательного переноса) | 54 |
| 2.8.1. | Общие сведения | 54 |
| 2.8.2. | Контакт поверхностей трения через пластически деформируемый мягкий и тонкий слой металла | 56 |
| 2.8.3. | Предотвращение процесса окисления металла на поверхностях трения | 58 |
| 2.8.4. | Реализация эффекта Ребиндера | 59 |
| 2.8.5. | Перенос частиц с одной поверхности трения на другую и удержание их в зоне контакта | 60 |
| 2.8.6. | Образование продуктов полимеризации смазочного материала на поверхности сервовитной пленки | 62 |
| 2.8.7. | Защита поверхностей трения от водорода | 63 |
| 2.8.8. | Возбуждение кристаллической решетки | 64 |
| 2.9. | Влияние металлоплакирующих присадок на окисление и вязкость масел | 66 |
| 2.10. | Эффект безызносности (избирательного переноса) как диссипативная структура | 67 |
| 2.11. | Исследование диссипативных структур | 69 |
| | Список литературы | 74 |
| Глава 3. | Области эффективного внедрения фундаментальных открытий в трибологии на основе самоорганизации (Гаркунов Д.Н., Мельников Э.Л., Бабель В.Г., Щедрин А.В., Суранов Г.И., Бабель А.Л., Чихачёва Н.Ю.) | 80 |
| 3.1. | Металлоплакирующие смазочные материалы | 80 |
| 3.1.1. | Основные характеристики металлоплакирующих смазочных материалов | 80 |
| 3.1.2. | Получение и исследование металлоплакирующих смазочных материалов с применением металлов переменной валентности | 81 |
| 3.1.3. | Инструментальный метод исследования поверхностей трения | 86 |
| 3.1.4. | Особенности кинетики износа пары трения при использовании металлоплакирующего смазочного материала | 87 |
| 3.1.5. | Влияние МСК «Валена» на эксплуатационные свойства современных смазочных материалов | 89 |
| 3.2. | Финишная антифрикционная безабразивная обработка рабочих поверхностей трибосопряжений | 93 |

| | | |
|-----------------|--|-----|
| 3.3. | Реализация безызносного трения при металлообработке | 129 |
| 3.3.1. | Совершенствование методов комбинированной обработки инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности на основе применения металлоплакирующих смазочных материалов | 129 |
| 3.4. | Безразборное восстановление изношенных машин | 145 |
| 3.5. | Разработка интеллектуальных материалов и на их основе универсальных узлов трения механизмов и машин | 148 |
| | Список литературы | 157 |
| Глава 4. | Реализация трибологии на основе самоорганизации в промышленности, на транспорте и в сельском хозяйстве (<i>Гаркунов Д.Н., Мельников Э.Л. Щедрин А.В., Бабель А.Л.</i>) | 162 |
| 4.1. | Общие сведения | 162 |
| 4.1.1. | Авиационная техника | 162 |
| 4.1.2. | Машины и механизмы морского флота | 163 |
| 4.1.3. | Механизмы и аппараты химических производств | 164 |
| 4.1.4. | Машины и аппараты бытовой техники | 165 |
| 4.1.5. | Металлообрабатывающее оборудование | 166 |
| 4.1.6. | Тяжелое машиностроение | 167 |
| 4.1.7. | Железнодорожный транспорт | 168 |
| 4.1.8. | Сельскохозяйственная техника | 169 |
| 4.1.9. | Червячные глобоидные и цилиндрические передачи | 170 |
| 4.1.10. | Буровое оборудование | 170 |
| 4.1.11. | Нефтепромысловое оборудование | 171 |
| 4.1.12. | Машины литейного производства | 172 |
| 4.1.13. | Безразборное восстановление плунжерных пар топливных насосов двигателей сельскохозяйственной техники | 173 |
| 4.1.14. | Безразборное восстановление тяжелого прессы | 175 |
| 4.1.15. | Применение избирательного переноса в подшипниках скольжения, работающих в воде | 176 |
| 4.1.16. | Работы профессора Г. Польцера | 177 |
| 4.1.17. | Работы профессора Р. Марчака | 179 |
| 4.2. | Материалы, реализующие избирательный перенос при трении | 182 |
| 4.2.1. | Конструкционные материалы | 182 |
| 4.2.2. | Присадки, композиции и смазочные материалы, реализующие эффект безызносности | 187 |
| 4.2.3. | Внедрение | 188 |
| | Список литературы | 190 |
| Глава 5. | Новый метод испытаний жидких и пластичных смазочных материалов на термостойкость (<i>Гаркунов Д.Н., Мельников Э.Л.</i>) | 192 |
| | Список литературы | 205 |
| Глава 6. | Трибология в XXI веке (<i>Гаркунов Д.Н., Мельников Э.Л.</i>) | 206 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 6.1. | Развитие машиностроения и трибология | 206 |
| 6.2. | Новый подход к изучению трибологии | 207 |
| 6.3. | Программа исследований водородного изнашивания и избирательного переноса | 209 |
| 6.4. | Исследование электрических, магнитных и вибрационных явлений при изнашивании | 214 |
| 6.5. | Совершенствование смазывания деталей | 215 |
| 6.6. | Экономика и трибология | 218 |
| 6.7. | Создание безызносных узлов трения машин | 219 |
| 6.8. | Защита деталей машин от водородного изнашивания | 224 |
| 6.9. | Расширение применения финишной антифрикционной безабразивной обработки трущихся деталей | 226 |
| 6.10. | Трибология, интересы здоровья и охраны окружающей среды. Пути решения экологических проблем | 228 |
| 6.11. | Подготовка инженерных кадров по трибологии | 233 |
| | Список литературы | 237 |
| | Заключение | 240 |
| | Сведения об авторах | 244 |

Введение

Трибология – наука о контактном взаимодействии твердых тел, охватывающая весь комплекс вопросов о трении, износе и смазке машин.

Трибология решает такие актуальные общенациональные проблемы как экономия энергии, сокращение материалов, надежности и безопасности механических систем, а также экологические проблемы.

Конечные результаты исследований и разработок по трибологии обеспечивают снижение затрат труда на техническое обслуживание и текущий ремонт машин, стоимость капитальных ремонтов, уменьшение расхода запасных частей и горюче-смазочных материалов, снижение металлоемкости конструкций узлов трения и повышение надежности и производительности машин.

Проблемы и задачи, решаемые трибологией, являются «вечными», ибо они непрерывно возникают и повторяются вновь и вновь в связи с развитием и совершенствованием машин и оборудования, повышением их мощности и более форсированных режимов работы, на которых ранее применяемые конструкционные и смазочные материалы не могут обеспечить их безотказность и долговечность.

Главные этапы развития трибологии, как и развитие других наук, связаны с научными открытиями и крупными изобретениями.

Трибология является поистине интернациональной наукой, теоретические основы которой были созданы трудами ученых различных стран.

Так, в 1883г. русским ученым Н.П. Петровым была открыта гидродинамическая теория смазки в подшипниках скольжения. В дальнейшем эту теорию развивали крупнейшие ученые мира: англичанин О. Рейнольдс, американец А. Кингсбери, немцы А. Зоммерфельд и Л. Гюмбель, русские академики Н.Е. Жуковский и С.А. Чаплыгин и др.

В 1919 – 1922 гг. англичанин В. Гарди выявил большое влияние адсорбционных слоев смазочных материалов, наносимых на металлы, на трение твердых тел: по сравнению с сухим трением при адсорбционном граничном слое смазки толщиной менее 0,1 мкм трение уменьшается в 10 раз, а износ снижается до 1000 раз. Классиками исследований граничного трения являются Ф.П. Боуден, Д. Тейлор, С.А. Ахматов, И.В. Крагельский, Б.В. Дерягин и многие другие.

Значительным событием в развитии триботехники явилось открытие эффекта адсорбционного пластифицирования материала трущихся деталей под действием смазочного материала, сделанное советским академиком П.А. Ребиндером, которое было названо его именем.

В 1956г. Д.Н. Гаркунов и И.В. Крагельский экспериментально установили при граничном трении самопроизвольное разделение трущихся поверхностей не только слоем смазки, но и металлической сервовитной пленкой толщиной 1,0...1,5 мкм, образующейся в процессе работы сопряжения. Установленный эффект известен как революционное научное открытие – избирательный перенос (ИП), также этот процесс в технической литературе называют эффектом безызносности. Эти понятия являются в определённой степени синонимами.

Эффект безызносности сопровождается эволюционными процессами самоорганизации трения, в результате которых на поверхности формируется металлическая пленка. В отличие от обычных условий смазки и разрушительного трения в условиях ИП трение превращается в созидательный процесс, защищающий поверхности сопряжений от износа и заедания, аналогичный (подобный) процессам в узлах трения живой природы (живого организма).

При анализе причин повышенного износа деталей самолетов Д.Н. Гаркунов и А.А. Поляков обнаружили новый, ранее неизвестный – водородный вид изнашивания деталей, который объяснял некоторые необычные явления при трении – интенсивное разрушение более прочных металлов и перенос их на менее прочный материал сопряжения. Явления водородного изнашивания и безызносного трения зарегистрированы как научные открытия.

Увеличение концентрации водорода в процессе изготовления деталей или в условиях эксплуатации приводит к внезапному хрупкому разрушению металлоконструкций в тонких поверхностных слоях и аварийному отказу машин при малых нагрузках. В связи с этим, защита металла от негативного воздействия водорода и водородного изнашивания трущихся поверхностей является весьма актуальной задачей.

Решение этих важнейших задач было получено при дальнейшем интенсивном развитии нового направления в трибологии – трибологии на основе самоорганизации, отличающегося от традиционного (классического) тем, что трение здесь рассматривается не как разрушительный процесс, что признано давно мировым сообществом ученых и инженеров, а как созидательный, базирующийся на отечественных научных открытиях безызносного трения и водородного изнашивания металлов.

Развитие трибологии на основе самоорганизации началось во второй половине прошлого века. За этот период сложилась международная научная школа трибологов ряда стран: России, Великобритании, Германии, Польши, Литвы, Белоруссии, Украины, Болгарии, Казахстана, Монголии. По трибологии на основе самоорганизации выпущено более ста книг и монографий, свыше 2000 журнальных статей, защищено 92 кандидатских и докторских диссертаций, получено свыше 100 патентов и авторских свидетельств на

изобретения, издана хронология литературы по развитию трибологии на основе самоорганизации с 1956г. по настоящее время.

На базе исследований в области трибологии на основе самоорганизации разработаны теоретические основы и триботехнологии создания новых трибоматериалов – присадок к маслам и смазочным материалам, позволяющих при эксплуатации машин и механизмов получать качественно улучшенные эксплуатационные показатели при одновременном повышении ресурса, снижения энергопотребления при эксплуатации машин, значительном уменьшении вредного влияния на среду обитания.

Российская наука совершила открытия, значения которых до конца трудно оценить и сегодня. В полном соответствии со словами крупного американского философа К. Пирса «...всякая наука открывает вещи, которые далеко выходят за пределы непосредственных наблюдений...», эффект безызносности (как он был назван первооткрывателями) затрагивает не только основные вопросы теории трения, износа и смазки, но и дополняет такие области передовых знаний как: современная термодинамика, синергетика, квантовая теория вещества, и даже (согласно последним исследованиям) – теория относительности. Сложность открытого Д.Н. Гаркуновым и И.В. Крагельским феномена привела к существующей синонимии названий: трибология на основе самоорганизации, ИП, безызносность, эффект Гаркунова, служащих отражением отдельных сторон рассмотрения этого многогранного явления, но до конца не определяющих всю его глубину и важность. При ИП происходит его автокомпенсация за счет сложных синергетических процессов внутри трибосистемы, Эти процессы классики ИП Д.Н. Гаркунов и А.А. Поляков назвали явлением самоорганизации трибосистемы.

Профессор Д.Н. Гаркунов впервые в 1950-х гг. выявил аналогии в самоорганизации трибосистем и биологических объектов, выраженные в способности самоусложнения первых за счет внутренней энтропии. Совместно с А.А. Поляковым и на основе работ И.Л. Пригожина Д.Н. Гаркунов предложил понятие диссипативных структур в трибологии представляющих собой «...пространственно-временные структуры, сохраняющиеся и циркулирующие неопределенно долго во времени, являющиеся высшей формой самоорганизации трибосистем». При этом Д.Н. Гаркуновым и А.А. Поляковым был сформулирован важнейший принцип, по своей научной значимости близкий к таким положениям квантовой и релятивистской теорий как принцип соответствия или инвариантности – «принцип совпадения эволюционного пути».

Данный принцип провозглашает сходство структуры и направления развитие физических процессов вне зависимости от природы внутренних механизмов, обеспечивающих их эволюцию при условии, что действие эволюционных сил приводит к сходным результатам. Последовательное применение этого принципа позволило выстроить корректную модель

процессов самоусложнения структуры трибосопряжения, что дает возможность рассматривать трение как процесс, происходящий внутри межфазной области фрикционного контакта и приводящий к образованию новой структурной единицы трибосопряжения – третьего тела, включающего в себя как непосредственно смазочные структуры, так и многочисленные изменения поверхностных и приповерхностных слоев материалов узлов трения. Этот революционный подход в теории смазки впервые позволил научно поставить задачу о практическом достижении предельно низких значений коэффициентов трения и уровней изнашивания, а также наметить пути решения этих проблем.

Необходимо отметить, что магистральные направления в теории ИП оказались абсолютно перспективными и продуктивными. По сути, решение задач современной теории трения идет по пути, отмеченном блестящей научной интуицией Д.Н. Гаркунова, И.В. Крагельского, А.А. Полякова, которые выстроив модель диссипативных структур, как пространственно-временных образований во многом предвосхитили «новую научную парадигму – релятивистскую физику твердого тела». Эволюция идей теории безызносности в трибологии на основе самоорганизации показывает, что заложенные в них принципы далеко не исчерпаны, а их дальнейшее развитие приводит к новым «прорывам» в фундаментальной и технической прикладной науке – трибология на основе самоорганизации.

В целях широкого ознакомления научно-технической общественности студентов машиностроительных вузов, колледжей и школьников старших классов с достижениями современной трибологии на основе самоорганизации создан учебно-образовательный комплекс.

Предлагаемая авторами книга рассчитана на научных работников, молодых исследователей трибологии на основе самоорганизации, аспирантов, студентов и специалистов, занимающихся повышением долговечности надежности машин и механизмов.

Авторы выражают благодарность в подготовке книги к печати преподавателям кафедры «Технологии обработки материалов» (МТ-13) МГТУ им. Н.Э. Баумана А.В. Бодаревой и М.А. Серезжину, а также к.т.н. Д.Н. Любимову и к.т.н. К.Н. Долгополову за активное обсуждение и ценные замечания по некоторым разделам книги.

Глава 1. Фундаментальные открытия в трибологии на основе самоорганизации

Развитие науки о трении и изнашивании в XX в., помимо создания молекулярно-механической теории трения и изнашивания, энергетической теории трения и многих крупных изобретений и разработок таких, как использование в качестве антифрикционных материалов полимеров, методов исследований износа деталей мечеными атомами, применения при исследовании поверхностей трения рентгеноструктурного рентгеноспектрального анализа, электронной микроскопии, изучения диффузионных процессов и т.д., увенчалось двумя научными открытиями: «Избирательный перенос при трении» (регистр №41 с приоритетом от 12 ноября 1956 г.) и «Водородное изнашивание металлов» (регистр № 378 с приоритетом от 7 мая 1967 г.).

Указанные открытия, проходили широкое предварительное обсуждение среди научных учреждений Академии наук и других организаций, а так же экспертизу Комитета Совета Министров СССР по делам изобретений и открытий. При оценке открытия Экспертный совет тщательно изучает практическое значение открытия. Это определяется изобретениями, сделанными на базе открытия. Так, в 1958 г. было сделано основополагающее изобретение «Способ придания поверхности металлов трущихся пар противозадирных свойств» (Авт. свид-во №115744 от 23 апреля 1958 г. Авторы Д.Н. Гаркунов и В.Н. Лозовский). В 1962 г. было сделано второе основополагающее изобретение «Металлоплакирующая смазка» (Авт. свид-во № 3179408 от 14 мая 1962 г. Авторы Д.Н. Гаркунов, В.Г. Шимановский, В.Н. Лозовский).

В настоящее время в мировой практике насчитывается более сотни изобретений и патентов, основанных на указанных основополагающих изобретениях и с каждым годом их число увеличивается. Общественные научно-технические организации и правительственные учреждения страны поддерживают работы, направленные на использование в промышленности изобретений, сделанных на базе научных открытий.

Отметим некоторые постановления советского периода.

Постановление бюро Президиума Всесоюзного совета научно-технических обществ «О реализации рекомендаций по внедрению избирательного переноса в машиностроении» Протокол №5 от 24 февраля 1977 г.

Постановление Государственного комитета СССР по науке и технике от 3 июля 1985 г. М 349 «О мерах по повышению технического уровня и качества машин, оборудования и приборов за счет сокращения потерь энергии на трение и увеличение срока их службы».

Постановление Совета министров СССР №359 от 25 марта 1987 г. «О мерах по широкому использованию эффекта безызносности в народном хозяйстве».

Доклад о явлении ИП при трении заслушивался в 1975 г. на Президиуме Академии наук СССР. Данное открытие было одним из приоритетных направлений в науке по трению и износу машин.

Отмеченные постановления и поддержка АН СССР дали огромный импульс работ по развитию новых методов повышения износостойкости машин и оборудования не только в нашей стране, но и в других странах, что можно проследить по публикациям в российской и зарубежной печати.

В 1977 г. Библиотека по естественным наукам АН СССР составила библиографический указатель по теме «Избирательный перенос при трении» за 1956 – 1977 гг., в котором значилось 242 наименования опубликованной литературы.

В 1980 г. эта же библиотека издала такой же библиографический указатель, в нем уже значилось 403 наименования литературных источников.

В изданном в 1988 г. в библиографическом указателе литературы по темам «Избирательный перенос при трении» и «Водородное изнашивание» значилось 906 литературных источников. Общее количество авторов составило 350 человек.

С 1986 г. издательство «Машиностроение» начало выпуск ежегодного сборника статей под названием «Долговечность трущихся деталей машин», в котором помещались работы, главным образом, по ИП при трении и водородному изнашиванию металлов. К 1990 г. было издано пять сборников общим объемом более 100 печатных листов. В многочисленных статьях, опубликованных в технической литературе, и сборниках излагались исследования как механизма ИП при трении, так и работы по изучению новых, ранее неизвестных, методов повышения износостойкости трущихся деталей различного рода машин и механизмов на основе указанных открытий.

Большое внимание уделялось повышению износостойкости деталей авиационной техники, военно-морского флота, тяжелого машиностроения, химической промышленности, станкостроения, легкой промышленности и сельскохозяйственной техники. По механизму ИП при трении и водородному изнашиванию металлов за прошедшие годы в России и за рубежом было проведено более 30 семинаров, совещаний и международных конференций с участием специалистов из России, стран СНГ, Великобритании, Германии, Польши и стран Прибалтики. Однако при всем этом окончательного и исчерпывающего механизма ИП до 90-х годов прошлого столетия не было.

С 1992 г. был начат выпуск международного научно-технического журнала «Эффект безызносности и триботехнологии». В этом журнале впоследствии стали систематически печататься статьи о механизме явления ИП при трении и водородного изнашивания металлов с новых позиций самоорганизующихся процессов при трении. Учредителями этого журнала были Общероссийское общественное объединение по избирательному переносу и самоорганизующимся системам при трении, Московский институт сельскохозяйственного производства им. В.П. Горячкина и Международный совет «Избирательный перенос и фрикционные покрытия».

К этому времени в России и странах запада широко распространились книги И. Пригожина, Г. Хакена, В. Эбелинга, Г. Николса и других о самоорганизующихся процессах неживой природы и термодинамике неравновесных процессов. Ярко выявилось новое междисциплинарное направление научных исследований, названное синергетикой.

В работах И. Пригожина (Бельгия) и его сотрудников проблемы самоорганизации разрабатывались с позиции диссипативных структур, в основе которых лежали идеи, методы и принципы нелинейной термодинамики неравновесных процессов.

Синергетика стала выступать в качестве нового образа научного мышления, необходимого при решении сложного комплекса разнообразных междисциплинарных задач, возникающих в связи с познанием и практическим решением проблем, которые встают, как в естествознании, так и в технике.

Оказалось, что физическая сущность эффекта безызносности и водородного изнашивания металлов может быть раскрыта исходя из положений, основанных на синергетике. Было установлено, что при эффекте безызносности поверхностный слой трущихся деталей представляет диссипативную структуру, при которой износ может быть равен нулю, а трение снижается по сравнению с трением при граничной смазке на порядок.

ИП при трении (эффект безызносности) характеризуется сложными физико-химическими процессами, протекающими в зоне контакта трущихся деталей, и базируется в первую очередь на самоорганизации неравновесных процессов (формирование сервитной металлической пленки), химии координационных соединений (взаимодействие смазочного материала с образовавшейся металлической пленкой) и физике тонких пленок (особая структура пленки, разрядка дислокаций, растворение металла, диффузионные процессы).

Авторы сочли необходимым привести дипломы на открытия безызносного трения и водородного изнашивания металлов.



ДИПЛОМ НА ОТКРЫТИЕ

В соответствии с Положением об открытиях, изобретениях и рационализаторских предложениях Комитет по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР установил, что граждане Союза Советских Социалистических Республик

ГАРКУНОВ Дмитрий Николаевич
КРАГЕЛЬСКИЙ Игорь Викторович

сделали открытие, определяемое следующей формулой:

„Обнаружено, что при трении медных сплавов о сталь в условиях граничной смазки, исключающей окисление меди, происходит явление избирательного переноса меди из твердого раствора медного сплава на сталь и обратного его переноса со стали на медный сплав, сопровождающееся уменьшением коэффициента трения до жидкостного и приводящее к значительному снижению износа пары трения“.

* * *

Настоящее открытие зарегистрировано в Государственном реестре открытий СССР под № 41 с приоритетом 12 ноября 1956 г.



Председатель Комитета

Ю. Максарева



ДИПЛОМ НА ОТКРЫТИЕ

№ 378

**"Явление образования насыщенной водородом
зоны в подповерхностном слое металла при трении
(явление "водородного изнашивания металлов")"**

В соответствии с Положением об открытиях, изобретениях и рационализаторских предложениях Государственный комитет по изобретениям и открытиям при Государственном комитете СССР по науке и технике установил, что

ГАРКУНОВ ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ
ПОЛЯКОВ АНДРЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ
ШПЕНЬКОВ ГЕОРГИЙ ПЕТРОВИЧ
МАТЮШЕНКО ВЛАДИМИР ЯКОВЛЕВИЧ

сделали открытие, определяемое следующей формулой:

Установлено неизвестное ранее явление образования насыщенной водородом зоны в подповерхностном слое металла при трении, заключающееся в том, что при трении его о водородсодержащий материал или металл в водородсодержащей среде происходит выделение водорода и локализация его в подповерхностном слое металла, обусловленное трибохимическими процессами и градиентами температуры, приводящее к диспергированию поверхности, а при пересыщении металла водородом - к его ожигению и последующему переносу на менее прочное контртело (явление "водородного изнашивания металлов").

На основании предоставленных полномочий Государственное патентное ведомство СССР выдало **Гаркунову Дмитрию Николаевичу** настоящий диплом на открытие "Явление образования насыщенной водородом зоны в подповерхностном слое металла при трении (явление "водородного изнашивания металлов)", зарегистрированное в Государственном реестре открытий СССР 8 февраля 1990 г. за № 378 с приоритетом 7 мая 1967 г. в части гипотезы о наводороживании металлов трением и 10 ноября 1971 г. в части экспериментального обнаружения явления по заявке на открытие № ОТ-7026 от 28 ноября 1968 г.

Председатель Государственного
патентного ведомства СССР

Ю.А.Беспалов

29 *01* *1992*

Глава 2. Механизм эффекта безызносности и его закономерности

2.1. Решение проблем трибологии, поставленных видными учеными в середине 60–70-х гг. XX века. Безызносное трение

Еще в довоенный период в 1930-е гг. наша страна из аграрной преобразовалась в индустриальную. Особенно большое развитие получила машиностроительная промышленность. Был создан целый ряд новых отраслей машиностроения (автомобили, тракторы, самолеты, химическая промышленность и т.д.). Относительно общего объема машиностроительной промышленности мы добились больших успехов и заняли к 1940 г. второе место в мире.

Одной из самых важных задач в этой области явилось совершенствование типов машин, которые обладали бы максимальной производительностью. Одним из существенных препятствий в деле производительности машин является недостаточная их износостойкость и большое потребление энергии (коэффициент трения между трущимися деталями). Все это указывает на исключительно большое значение проблемы износа и трения в деле развития машиностроительной промышленности.

Характерно то, что до сего времени в наших вузах недостаточно внимания уделяется проблеме трения и износа в машинах. В связи с этим еще в 1939 г. академиком Е.А. Чудаковым была организована первая всесоюзная конференция по трению и износу. Конференция имела своей целью дать обзор всех тех основных работ, которые велись в стране по проблеме трения и износа в машинах и на базе этих работ дать конкретные предложения по внедрению в промышленность отдельных достижений и по дальнейшей постановке научно-исследовательской работы по этой проблеме.

Академик Е.А. Чудаков отметил на этой конференции, что в учебных планах вузов отсутствует специальная дисциплина по этим вопросам, и соответствующая литература и мало специалистов готовится по этой важной проблемной тематике. Великая Отечественная война прервала развитие промышленности нашей страны на четыре года. Машинный парк оказался полностью изношенным, и необходимо было его быстрое восстановление, стояли задачи новых ремонтных технологий.

В последующие два десятилетия ученые-трибологи в результате теоретических и экспериментальных исследований выявили крайне важные проблемы, касающиеся механизмов износа деталей, нашли новые пути, способные снизить износ деталей, коэффициент трения, температурный режим в узлах трения, энергозатраты, экологические проблемы.

Наука о трении, износе и смазке машин обогатилась весьма важными результатами исследований: механизма износа при граничном трении, контакта поверхностей при сухом и граничном трении, влияния на трение и износ тонких

пластичных плёнок, механизма износа поверхностей при схватывании их в случае высоких удельных давлений, влияния водорода на повреждение поверхностей (открытие водородного износа), а также открытием эффекта безыносного трения и многих других исследований в трибологии.

В этот период были проведены научные всесоюзные конференции по трению и износу: 1-я конференция – в 1949 г. (труды были опубликованы в двух томах в 1950 г.) и 3-я конференция – в 1960 г. (труды опубликованы в 1961 г.).

Остановимся более подробно на тех крупных достижениях, о которых сказано ранее. В 1950 г. доцентом Одесского института инженеров морского флота Л.В. Елиным была защищена докторская диссертация по теме механизма граничного трения, в которой было показано, что при таком виде трения происходит износ поверхностей без разрушения масляной пленки в результате взаимного внедрения отдельных участков одной поверхности в другую поверхность.

До опубликования этой работы считалось, что касание поверхностей обусловлено погрешностями технологий их обработки, а также процессами износа. Между тем контактирование под нагрузкой поверхностей тел, из которых хотя бы одно – поликристаллическое при однородной поверхности другого, связано с образованием шероховатости вследствие неоднородности деформации. Это означает, что будь поверхность с гетерогенной структурой даже идеально гладкой, она, как и сопряженная с ней поверхность, приобретает под нагрузкой шероховатость.

В результате неоднородности различных структурных составляющих сплава по твёрдости, а также разной ориентировки кристаллических зерен, выходящих на поверхность, на отдельных площадках фактического контакта, начиная с малых нагрузок, происходит взаимное внедрение твердых составляющих и кристаллов, обращенных к поверхности «сильными» гранями, в менее твердые структурные составляющие и «слабые» грани кристаллов. Это *первая* проблема.

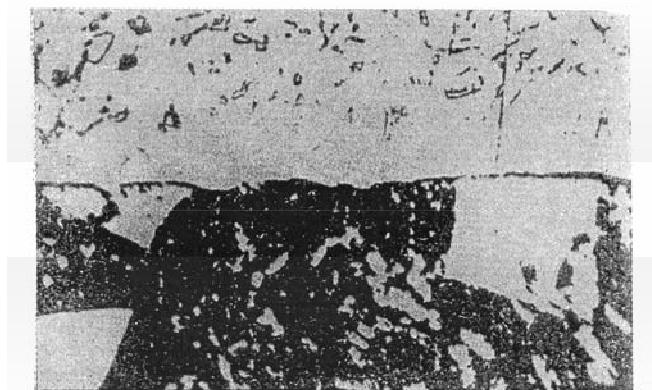


Рис. 2.1. Сечение сжатых давлением стальных и бабитовых пластин

На рис. 2.1 показано сечение сжатых давлением 3,0 МПа пластин с первоначально гладкими сопряженными плоскостями, из которых стальная поверхность шлифовалась до параметра шероховатости $Ra = 0,5$ мкм, а поверхность баббита полировалась.

Взаимное внедрение при работе узла трения приводит к пропахиванию материала одной поверхности материалом другой поверхности. Поверхность трения покрывается мелкими рисками, что приводит к усталостному виду изнашивания деталей. Эта первая проблема усталостного вида изнашивания до настоящего времени не решена.

Вторая проблема изнашивания деталей при сухом и граничном трении была поставлена ведущим российским ученым профессором И.В. Крагельским. Он показал, что при изучении процесса взаимного контактирования поверхностей при трении следует различать три вида поверхностей: номинальную площадь контакта, контурную площадь контакта и фактическую площадь контакта.

Установлено, что фактическая площадь контакта в каждый момент трения представляет собой от 1/100 до 1/10000 номинальной площади контакта (вся площадь контакта, участвующая в трении (рис. 2.2)). Как следствие на участках фактического контакта возникает огромное удельное давление, что приводит к возникновению высоких температур до 1000 °С, разрушению масляной плёнки и естественно, повышенному износу.

Эта вторая проблема, поставленная И.В. Крагельским, во многих узлах трения машин и механизмов также до настоящего времени не решена.

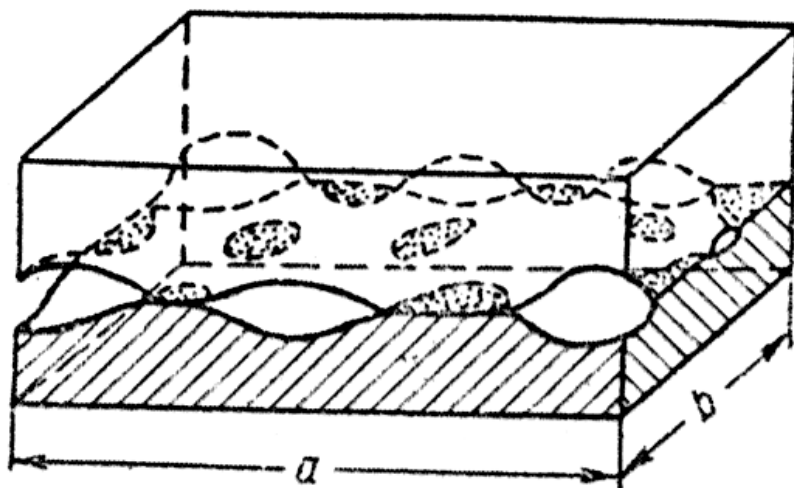


Рис. 2.2. Схема контактирования деталей

Еще в 1944 г. ведущие ученые Великобритании Ф.П. Боуден и Д. Тейбор исследовали влияние толщины пленки индия, нанесенной на одну из поверхностей трущейся пары сталь – сталь на коэффициент трения (рис. 2.3).

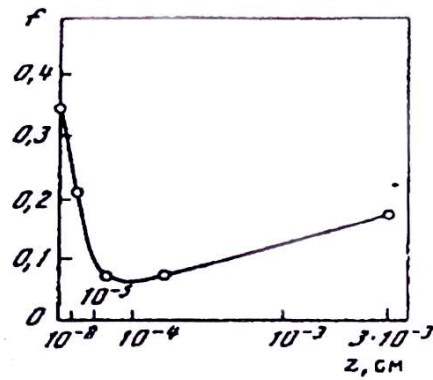


Рис. 2.3. Зависимость коэффициента трения от толщины пленки индия, нанесенной на сталь

Установлено, что при уменьшении толщины пленки индия коэффициент трения может снизиться в 7 – 8 раз. Этот важный результат использовался в частности в авиационной технике. Так, например, гальваническим путём плёнку индия наносили на бронзовый подшипник центрального шатуна звездообразного авиадвигателя. В силу сложностей нанесения тонких пластичных пленок металлов на трущиеся детали машин широкого использования метод гальванического покрытия индием, бронзой и другими мягкими металлами для уменьшения трения и возможного задира поверхностей трения не нашел широкого применения, не смотря на его высокую эффективность. Таким образом, выкристаллизовалась *третья* проблема при снижении трения – покрытие трущихся поверхностей тонкими пленками мягких материалов.



Рис. 2.4. Задиры болтов шарнирного сочленения самолета типа ТУ на поверхностях трения

Четвертая проблема состоит в том, что многие детали, особенно в парах трения сталь – сталь, или сталь – чугун (цилиндро-поршневая группа

двигателей внутреннего сгорания, шарнирно-болтовые сочленения шасси самолетов и др.) подвергаются при приработке, или вообще при начальной их работе задирам и схватыванию сопряженных поверхностей (рис. 2.4, 2.5). Эту проблему в 1950-60 гг. исследовали крупные ученые В.Д. Кузнецов, В.Н. Лозовский и др. и опубликовали ряд книг по механизму процессов схватывания и заедания в авиационной технике, в частности схватыванию шарнирно – болтовых сочленений.

И наконец, отметим *пятую* проблему, которая была установлена с открытием водородного изнашивания. Как известно, в 1960-е гг. было открыто явление водородного изнашивания, которое состояло в том, что при сухом и граничном трении образуется диффузионно-способный водород, образование которого связано с разложением воды на водород и кислород, находящийся в зоне фрикционного контакта, а также разложением топлива и смазочных материалов с выделением водорода. Водород проникает в стальные и чугунные детали, концентрируется в поверхностном слое деталей и усиленно их разрушает.

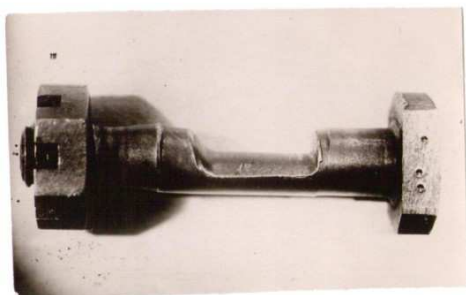


Рис. 2.5. Интенсивно изношенный болт крепления щитка закрылок двигателя самолета за несколько часов полета

Если проанализировать отмеченные пять проблем, стоящих перед трибологией, то можно полагать, что для их решения потребуются совершенно разные методы. Однако, как показали практические и научные исследования, возможен только один путь их решения. Решение указанных проблем – замена различных видов трения на один вид – безызносное трение.

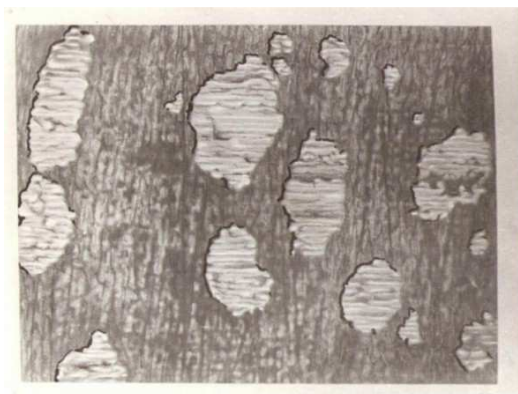


Рис. 2.6. Начальная стадия образования защитной металлической сервовитной пленки на поверхности стальных сопряженных деталей.

В середине 1950-х гг. прошлого столетия при исследовании технического состояния шасси самолетов было обнаружено явление самопроизвольного образования тонкой пленки меди в парах трения бронза – сталь при смазывании их спиртоглицериновой смесью. Пленка меди толщиной 1..2 мкм в процессе трения покрывала как бронзу, так и сталь. Она резко снижала износ узла трения и уменьшала силу трения примерно в 10 раз. Почти в то же время подобное явление было обнаружено в парах трения сталь – бронза при смазывании смазкой ЦИАТИМ-201 в шарнирно-болтовых соединениях самолетов.

Исследования показали, что медная пленка в паре сталь – бронза образуется в результате анодного растворения бронзы. При этом легирующие элементы цинк, олово, алюминий уходят в смазочный материал, и поверхность обогащается медью. После того как поверхность бронзы и стали покроеется медью, растворение бронзы прекращается и устанавливается режим безыносного трения.

В узлах трения компрессора домашнего холодильника медная пленка в паре сталь–сталь возникала в результате растворения медных трубок охладителя холодильника. Ионы меди, поступая в маслофреоновую смесь, двигались в зону контакта, где формировалась защитная медная пленка. Компрессоры холодильников могут работать десятки лет без ремонта.

Пленка при изнашивании образуется вновь. Она имеет иную структуру, в ней много вакансий и мало дислокаций. Она может и многократно деформироваться, без упрочнения и переупрочнения. Пленку назвали сервовитной от сочетания двух иностранных слов: серво – это обслуживание, сервис; витте – жизнь.

При дальнейшей работе, сервовитная пленка, по существу является участками фактического контакта, которые полностью занимают всю номинальную поверхность трения. Толщина пленки примерно 1..2 мкм, что приводит по Ф.П. Боудену и Д. Тейбору к очень низкому коэффициенту трения, а проблема, поставленная Л.В. Елиным объясняется тем, что пропахивание поверхностей трения вообще не происходит, поскольку взаимодействие стальных поверхностей не имеет места.

На рис. 2.6 видны продольные риски первоначально образовавшиеся в результате механической обработки стальной поверхности, поперечные – как следы трения на участках, покрытых сервовитной пленкой. Таким образом, нанесение тонкой металлической пленки из меди, олова, бронзы или латуни, как показал большой эксплуатационный опыт в авиационной технике, является одним из самых эффективных методов защиты поверхностей от схватывания и заедания узлов трения.

Как оказалось, сервовитная пленка, самопроизвольно образующаяся в зоне контакта, является также одним из самых эффективных методов защиты поверхностей от водородного изнашивания, она не пропускает проникновения

водорода в контактирующие стальные поверхности. В последующие три десятилетия 1960-1990 гг., проводили дальнейшее изучение научных открытий эффекта безызносности и водородного изнашивания металла.

Эффект безызносности – явление, по своему характеру противоположное изнашиванию: если при изнашивании во время трения все процессы в зоне контакта сводятся к разрушению поверхности, то процессы при ИП носят созидательный характер: они необратимы и относятся к самоорганизующимся процессам неживой природы.

Под эффектом безызносности подразумевается принцип, на основе которого уменьшаются силы трения и интенсивность изнашивания деталей. Между тем, в реальных условиях можно достичь такого результата, когда поверхности трения не только не изнашиваются, но и могут восстанавливаться. Создаются условия восстановления изношенных машин без их разборки. Это требует применения специальных технологий.

Контактирование деталей происходит не по всей поверхности трения, а только в отдельных точках (отношение фактической площади контакта к номинальной составляет 1:100 – 1:10 000). Учитывая указанные выше факторы, вызывающие изнашивание узлов трения, длительное время главным направлением борьбы с изнашиванием и уменьшением сил трения было повышение твердости поверхностей трения деталей машин.

При повышении твердости материала уменьшается взаимное внедрение одной поверхности в другую, снижаются пластические деформации и окислительные процессы, а также действие абразива. Было разработано много методов повышения твердости деталей: цементирование, хромирование, азотирование, поверхностная закалка, наплавка твердыми материалами и др. Это решило многие вопросы, связанные с повышением ресурса машин и оборудования. Так, электролитическое хромирование цилиндров двигателей внутреннего сгорания не только повысило износостойкость пары трения цилиндр - поршневое кольцо в 4...5 раз по сравнению с износостойкостью чугунных цилиндров, но и в большой степени снизило потери на трение в цилиндропоршневой группе двигателей.

Однако с увеличением нагрузок в узлах трения, ухудшением в некоторых случаях условий смазывания деталей, с повышением требований к КПД механизмов, применением специальных смазочных материалов и жидкостей, а в некоторых механизмах в связи с использованием в качестве смазочного материала воды методы повышения износостойкости деталей путем увеличения их твердости перестали себя оправдывать. Напомним, что фактическая площадь контакта с увеличением твердости материала уменьшается. В результате перекосов деталей при эксплуатации увеличивается возможность их заедания или роста интенсивности изнашивания.

Если в трении участвует только одна деталь, например лемех плуга или зуб ковша экскаватора, нож бумагорезательной машины, то невозможно исключить изнашивание режущей кромки этих деталей. Но при трении в сопряжении двух деталей, между которыми находится смазочный материал, условия контакта деталей меняются. Здесь трущуюся пару можно рассматривать как термодинамическую систему, где возможен обмен поверхностями трения с внешней средой (смазкой) энергией и веществом и, следовательно, возможно образование новых структур на основе самоорганизующихся процессов. Это и было обнаружено в стойках шасси самолетов при работе пары трения сталь – бронза и узлах трения компрессора домашнего холодильника в парах трения сталь – сталь.

2.2. Первоначальные сведения о самоорганизации в узлах трения

В поисках новых путей повышения износостойкости деталей машин целесообразно обратиться к живой природе. Анализ нагруженных подвижных сочленений живых существ показывает, что имеются два типа узлов трения — открытые и закрытые. Открытость и закрытость здесь понимается не в термодинамическом понятии, а в смысле попадания на трущиеся поверхности абразивных частиц, влаги, пыли и других веществ.

В открытых узлах трения работает твердый материал по твердому – это зубы животных. Закрытые узлы трения – суставы живых организмов, "сконструированные" на принципах, которые в машиностроении не применяют. На твердой кости располагается мягкий хрящ, на поверхности которого имеется тонкая подвижная полимерная пленка. Сопряженная поверхность имеет такую же структуру. В суставе работают два одинаковых материала, причем мягкий по мягкому (рис. 2.7, а).

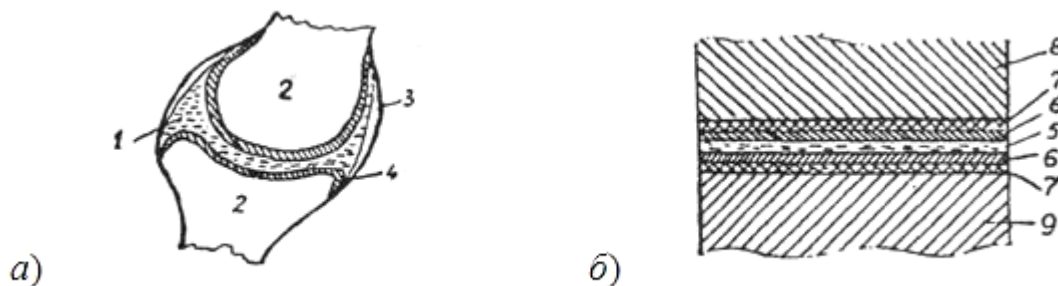


Рис. 2.7. Схема коленного сустава человека, по Д. Муру (а), и пары трения бронза-сталь, работающей в режиме ИП (б):

1 – синовиальная жидкость; 2 – кость; 3 – синовиальная оболочка; 4 – суставной хрящ; 5 – жидкость, обеспечивающая режим ИП; 6 – полимерная пленка; 7 – серовитная пленка(медь); 8 – сталь; 9 – бронза

Суставы здорового человека имеют коэффициент трения 0,001...0,03, что много меньше коэффициента трения в гидродинамических радиальных

подшипниках или в прецизионных подшипниках качения. Хотя поверхность хряща сустава и имеет шероховатость, но в процессе нагружения сустава и его движения площадь фактического контакта в результате смятия шероховатостей близка к 100 %. Сравним работу сустава человека и пары трения бронза – сталь в режиме ИП (см. рис. 2.7).

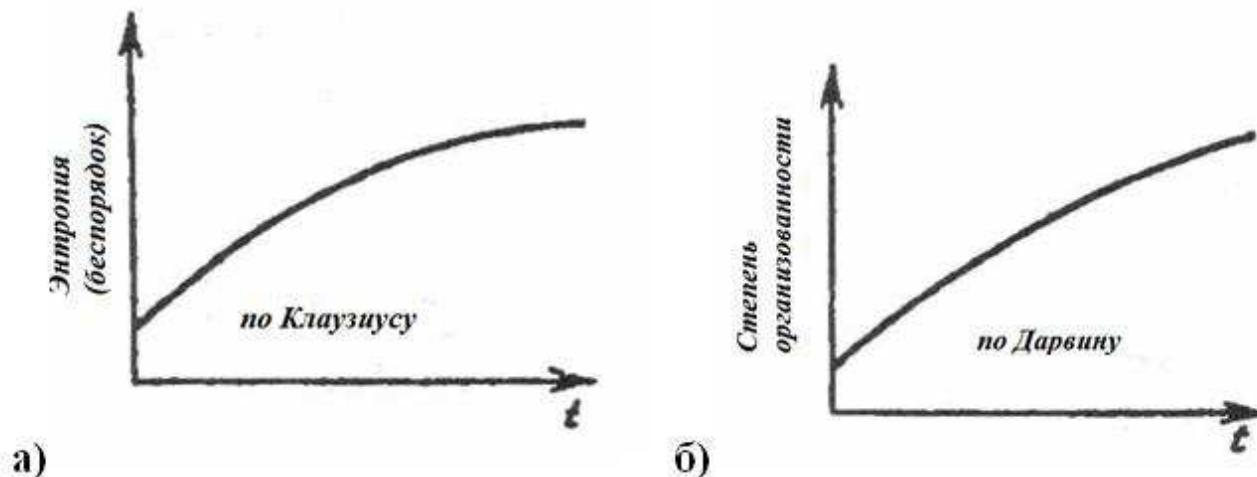


Рис. 2.8. Рост беспорядка в соответствии со вторым законом термодинамики (а) и рост степени организованности в соответствии с законом Дарвина (б)

Анализ приведенных схем показывает, что имеется достаточно четкая внешняя аналогия между работой сустава живого организма и пары трения бронза – сталь в режиме ИП. Эта аналогия лишь внешняя. В действительности механизм работы сустава живого организма в тысячи раз сложнее. Заметим, что подобные пары трения (у мыши, слона, рыбы, птицы) являются универсальными узлами, обладающими безызносностью. Известно, что биологические системы обладают способностью к самовосстановлению и могут работать десятки лет без износа.

Долгое время существовало как бы противоречие законов развития живой и неживой природы. Основной закон термодинамики Клаузиуса предсказывает рост энтропии, т.е. беспорядка в замкнутой системе. Эволюционная теория Дарвина, наоборот, устанавливает, что в основе отбора лежит повышение степени организованности биологических систем. Эти взаимно противоположные законы развития можно представить графически (рис. 2.8).

Однако в последние десятилетия биологическая эволюция стала рассматриваться с кибернетических позиций и понятий автоматического регулирования и обратной связи, что в значительной степени сблизило эти два закона развития мира. Помимо сказанного, основную роль в указанном сближении следует отнести к спонтанному формированию структур в открытых системах на молекулярном уровне. Установлено, что в открытых системах, которые постоянно получают из внешней среды отрицательную

энтропию и вещество, могут возникать стационарные неравновесные состояния с высокой степенью упорядоченности.

В соответствии с термодинамикой неравновесных процессов новые структуры могут возникать в природе в тех случаях, когда выполняются следующие четыре необходимых условия:

1. система является термодинамически открытой, т.е. может обмениваться веществом и/(или) энергией E со средой;
2. динамические уравнения системы нелинейные;
3. отклонения от равновесия превышают критическое значение;
4. микроскопические процессы происходят кооперативно (согласованно).

Второй закон термодинамики связан с первым условием: в системах, способных к формированию структур, он не нарушается, а лишь проявляется в более общем виде. Второе и третье условия указывают, что нужно отойти от привычных линейных физических представлений и вступить в нелинейную область, где при определенных условиях упорядочение может наступить самопроизвольно. Четвертое условие отражает причинность образования процессов, идущих на микроскопическом уровне, при наличии особых связей, которые ведут к спонтанному возникновению структур.

Во многих явлениях неживой природы явно отсутствуют какие-либо признаки самоорганизации, наблюдается распад системы и увеличение энтропии. Так, кусок обычного сахара, выставленный на воздух, через некоторое время испаряется, исчезает. Обратного явления не происходит, сахар "из ничего" не образуется. След самолета в небе из конденсированных паров воды также вскоре рассеивается, пропадает. Подобных примеров множество.

Но вот другие примеры. При определенных условиях из паров воды, находящихся в воздухе, образуются (выпадают) снежинки. Они имеют правильную форму и по структуре более высокую организацию, чем обычный пар. Здесь налицо явная самоорганизация. Из расплавов металлов или растворов солей образуются кристаллы. Это примеры самоорганизации неживой природы. Самоорганизация не является универсальным свойством материи и существует лишь при определенных внутренних и внешних условиях. Вместе с тем это свойство не связано с каким-то особым классом веществ.

Узел трения в неживой природе может удовлетворять требованиям самоорганизации. Он представляет собой открытую систему. К нему подводится энергия от электродвигателя, вращающего механизм, или от двигателя внутреннего сгорания. Как правило, узлы трения смазываются. Смазочный материал состоит из множества одинаковых элементов, в данном

случае — молекул. В нем могут быть мицеллы, ионы металлов. Все это создает условия для самоорганизации новых структур.

До последнего времени считалось, что трение является разрушительным процессом. Обратное утверждение считалось абсурдом, как и то, что можно создать узел, который бы не изнашивался. Тем не менее, трение может быть созидательным процессом, и безызносность – это реальный процесс.

2.3. Безызносность в узлах трения компрессора холодильника

Рассмотрим один из примеров самоорганизации — узлы трения компрессора домашнего холодильника. Компрессор холодильника, как уже отмечалось, работает десятки лет в тяжелых условиях (постоянные пуски и остановки) практически без износа. Детали, работающие на трение, выполнены из стали,

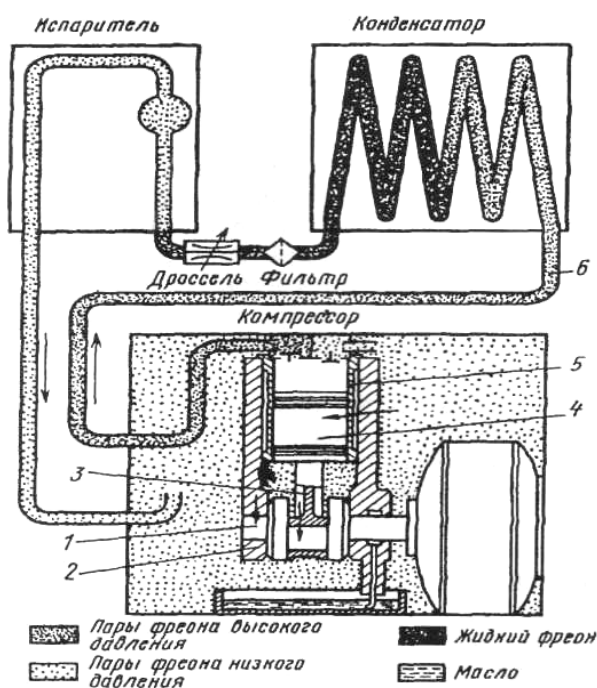


Рис. 2.9. Схема смазывания компрессора домашнего холодильника:

1 – коленчатый вал; 2 – подшипники коленчатого вала; 3 – шатун; 4 – поршень; 5 – цилиндр; 6 – змеевик из медных труб (места отложения меди показаны стрелками)

В процессе работы на поверхностях трения стальных деталей – шейках коленчатого вала (шатунной и коренных), сопряженных подшипниках, поршне и цилиндре – самопроизвольно образуется тонкая медная пленка толщиной 1... 2 мкм. Пленка формируется из ионов меди, образующихся в смазочном материале в результате незначительного коррозионного процесса медных трубок охладителя. Медные трубки растворяются маслофреоновой смесью, и в ней появляются ионы меди. К месту контакта трущихся деталей ионы приносят

охлаждающая смесь из фреона и масла, исполняющая также роль смазочного материала (рис. 2.9).

Активность маслофреоновой смеси по отношению к медным трубкам охладителя повышается в результате образования в зоне трения при начальной работе компрессора слабых кислот (окисления масла). После того как в зоне контакта образуется пленка меди, условия трения деталей изменяются: снижается давление, уменьшается сила трения и падает температура. В результате процессы (окисление масла и растворение трубок), способствующие образованию пленки меди, могут прекратиться. Таким образом, как установил А.К. Прокопенко, можно отметить следующую цепочку взаимообусловленных явлений, происходящих в смазочной системе компрессора и на поверхностях трения деталей.

Начальный период:

1. В паре трения сталь–сталь смазочный материал окисляется, образующиеся кислоты растворяют поверхностные слои медных трубок охладителя и доставляют в смазочную систему ионы меди.
2. Ионы меди, циркулируя в смазочной системе, осаждаются на поверхностях деталей только в зоне трения; узкие щели на деталях по отношению к массе детали представляют собой анодные участки; ионы меди втягиваются в зазоры соединений;
3. В результате коллективного взаимодействия ионов происходит кристаллизация и образуется тонкая пленка меди, покрывающая поверхности трения деталей.

Установившийся режим:

4. После того как поверхности трения покроются пленкой меди, пара трения сталь–сталь становится парой медь–медь; это приводит к снижению трения и, как результат, к снижению интенсивности окисления маслофреоновой смеси и прекращению растворения медных трубок (структура медной пленки и ее антифрикционные свойства описаны далее);
5. В установившемся режиме трения медная пленка не изнашивается. Ее частицы могут переходить с одной поверхности трения на другую. Продукты износа пленки удерживаются в зазоре электрическими силами.

На основании рассмотренного примера можно утверждать, что трение может сопровождаться эволюционными процессами, в результате которых разрушение поверхностей становится второстепенным. Главным выступает созидательный характер трения, который обусловлен обменом узла трения с внешней средой энергией и веществом, а также коллективным поведением ионов меди, из которых формируется тонкая медная пленка, защищающая поверхности трения от изнашивания. Металлическую медную пленку,

образующуюся в процессе трения, называют "сервовитной" (от лат. servo-witte – спасать жизнь). Она представляет собой вещество (в данном случае металл), образованное потоком энергии и существующее в процессе трения. Трение не может уничтожить пленку, оно ее создает. Образование защитной пленки относится к новому классу самоорганизующихся явлений неживой природы.

При деформировании сервовитная пленка не разрушается и не подвергается усталостному разрушению. Она воспринимает все нагрузки, покрывая шероховатость поверхностей стальных деталей, которые практически не участвуют в процессе трения. Структура пленки отличается от структуры обычной меди; она квазижидкая – имеет много вакансий и мало дислокаций, образуется в процессе трения (в стесненных условиях). Об этом изложено далее.

Теперь вспомним принцип работы узла трения, созданного природой, – сустав живого организма: мягкий материал работает по мягкому материалу. Нагрузка распределяется равномерно по поверхности трения, поэтому на единицу площади она незначительна. Это способствует продлению жизни узла трения. Такая же картина происходит и при работе узла трения в режиме ИП.

2.4. Механизм образования сервовитной пленки

В зависимости от вида смазочного материала, условий работы узла трения и конструкционных материалов, из которых изготовлены трущиеся детали, механизм формирования сервовитной пленки может быть различным.

Формирование сервовитной пленки в паре бронза—сталь при смазывании глицерином. Глицерин является модельной жидкостью, которая легче других реализует режим ИП при трении пары бронза—сталь. В первый период работы пары происходит растворение поверхности трения бронзы. Глицерин действует как слабая кислота. Атомы легирующих элементов бронзы (олово, цинк, железо, алюминий и др.) уходят в смазочный материал, в результате поверхность бронзы обогащается атомами меди.

После ухода атомов легирующих элементов с поверхности бронзы деформация ее при трении вызывает диффузионный поток новых атомов легирующих элементов к поверхности, которые затем уходят в смазочный материал. Таким образом, слой бронзы, который деформируется при трении, освобождается от легирующих элементов и состоит в основном из меди. В нем образуется большое количество вакансий, часть из них нигилирует, образуя поры, которые заполняются молекулами глицерина.

Глицерин, как известно, является восстановителем окиси и закиси меди, поэтому поверхность трения медной пленки свободна от окисных пленок, она очень активна и способна к схватыванию со стальной поверхностью, так как имеет свободные связи. В результате стальная поверхность постепенно покрывается тонким слоем меди. Поскольку слой меди, образующийся на

бронзовой поверхности, утончается вследствие его переноса на стальную поверхность, то происходит дальнейшее растворение бронзовой поверхности. Этот процесс происходит до тех пор, пока на обеих поверхностях, стальной и бронзовой, не образуется слой меди толщиной 1...2 мкм (рис. 2.10).

После того как медная пленка покрывает бронзовую и стальную поверхности, молекулы глицерина уже не могут взаимодействовать с бронзой и "вытягивать" атомы легирующих элементов, процесс растворения бронзы прекращается и наступает установившийся режим ИП.

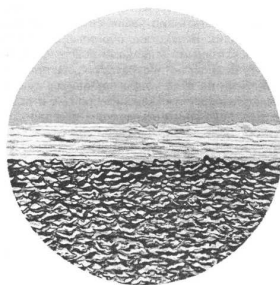


Рис. 2.10. Пленка меди на стальной поверхности (косой срез)

Как установил С. Г. Красиков, процесс образования сервовитной пленки на стальной поверхности происходит дискретно. Частицы меди с бронзовой поверхности переносятся на вершины неровностей стальной поверхности, т.е. на участки стали, которые непосредственно контактируют с бронзой. Затем постепенно происходит "сползание" накопившейся меди во впадины неровностей.

Глицерин при трении разрушает окисную пленку и на стальной поверхности, являясь восстановителем, как и для меди, обеспечивает высокую прочность сцепления медной пленки со стальной поверхностью. В результате последняя покрывается медной пленкой, и пара трения сталь–бронза становится парой медь–медь.

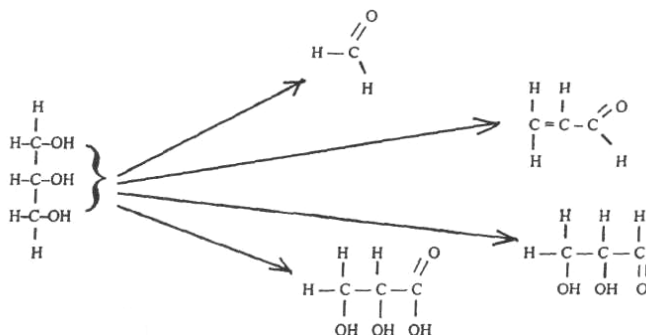
В процессе приработки в случае ограниченного объема смазочного материала в нем могут образоваться мицеллы – частицы меди, окруженные плотным кольцом молекул смазочного материала. Мицеллы имеют заряд, что удерживает их в зазоре. Иногда мицеллы выходят из зазора, тогда под действием электрического поля они попадают в узкие щели, например, между испытуемым образцом и подложкой, или под головку болта, крепящего образец, и там образуют тонкую пленку меди. Образование пленки меди на бронзовой поверхности происходит в результате электрохимического процесса – процесса растворения металла.

Согласно закону электрохимической кинетики, скорость анодного растворения должна возрастать при увеличении потенциала, однако в условиях ИП этого не происходит. Вследствие образования сервовитной пленки между анодными и катодными участками поверхности бронзы процесс растворения

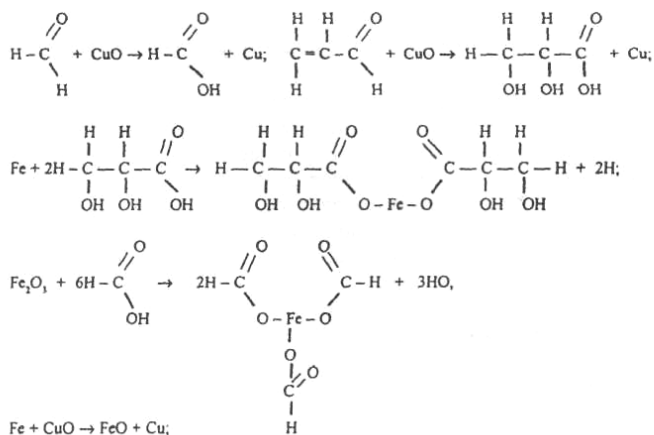
может полностью прекратиться, наступит установившийся режим трения. Если по каким-либо причинам медная пленка разрушится, то вновь произойдет растворение бронзы, и поверхность будет обогащаться медью, пока снова не наступит пассивное состояние.

В процессе образования сервовитной пленки в глицерине проходят изменения. Ю.С. Симаков и А.А. Поляков установили следующие химические превращения глицерина:

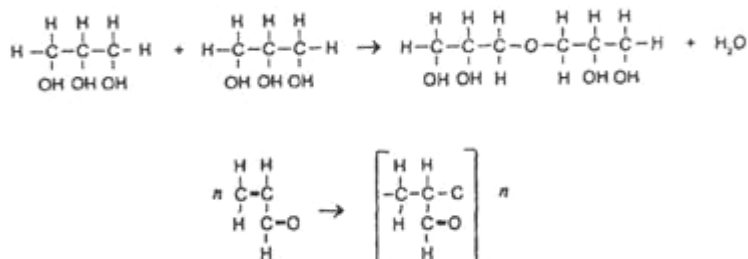
а) механохимические превращения с уменьшением молекулярной массы:



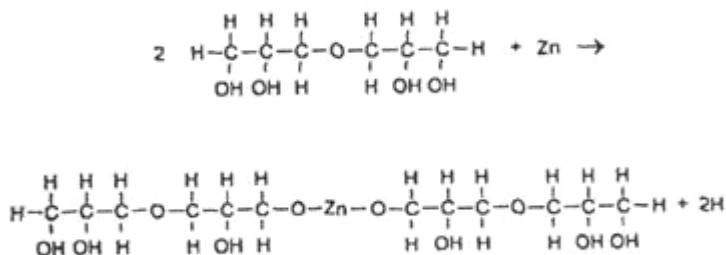
б) взаимодействие продуктов превращения; происходит восстановление продуктов коррозии и растворение активных металлов их соединений:



в) может происходить образование высокомолекулярных соединений, а также полимеров трения:



Образующиеся полимеры трения создают дополнительный слой (помимо меди), разделяющий основной металл пары трения от непосредственного контактирования:



г) образование поверхностно-активных веществ (обладая высокой активностью, они адсорбируются на поверхности деталей трения, могут вступать в химическое взаимодействие с поверхностями деталей, образуя хемосорбционные слои; участвуют также в мицеллообразовании) (рис. 2.11).



Рис. 2.11. Мицеллообразование и взаимодействие поверхностно-активных веществ с бронзовой поверхностью:

а – мицелла; б – начальный период растворения; в – поверхность бронзы после растворения обогащена медью

Помимо отмеченного происходят и каталитические превращения. Поверхность меди при отсутствии окисной пленки может вызвать дегидрогенизацию спирта. В результате выделяется свободный водород, который активно участвует в процессе трения, – восстанавливает окисные пленки на медном сплаве и на стали, поддерживая процесс безокислительного трения. При температуре более 65 °С увеличивается выделение водорода, и режим ИП переходит в водородное изнашивание. Поверхность стального образца интенсивно насыщается водородом, растрескивается и в виде порошка переносится на поверхность бронзы.

Необходимо сделать следующее замечание. Температура 65 °С – критическая температура реализации ИП в паре бронза– сталь только при смазке глицерином. При других смазочных материалах критическая температура будет равна температурной стойкости этой смазки.

Выше рассмотрен механизм образования сервовитной пленки в паре бронза–сталь в среде глицерина. Глицерин имеет простую химическую формулу и легко реализует режим ИП. В реальных конструкциях глицерин как смазочный материал не применяют. Ранее в гидросистемах самолетов в качестве гидрожидкостей применяли спиртоглицериновую смесь, где осуществлялись все вышеописанные процессы. Впоследствии спиртоглицериновую смесь заменили на более сложную в химическом отношении гидрожидкость АМГ-10. В этой жидкости режим ИП в паре бронза– сталь осуществляется при более высоком давлении. Жидкость АМГ менее активна в химическом отношении, чем спиртоглицериновая смесь.

При высоких давлениях режим ИП в паре бронза–сталь может наблюдаться при смазывании узлов трения ЦИАТИМ-201 и обычными минеральными маслами, особенно в узлах трения с возвратно-вращательным движением. Как установлено О.Н. Курловым, кинематика узла трения существенно влияет на процесс образования сервовитной пленки. В обратной паре трения режим ИП проявляется в большей степени, чем в прямой.

1. Сервовитная пленка может образовываться в узле трения сталь– сталь при работе с металлоплакирующими смазочными материалами, содержащими мелкие частицы бронзы, меди, свинца, серебра и др. При использовании ЦИАТИМ-201 с добавками порошка меди, бронзы или латуни, а также свинца в паре сталь–сталь поверхности деталей покрываются тонкой пленкой, состоящей из металла применяемых порошков. В процессе работы порошки частично растворяются в смазочном материале и в результате восстановления окисных пленок на их поверхности прочно схватываются со сталью, образуя сервовитную пленку. Такие пленки пластичных металлов пористы и содержат в порах смазочный материал. Коэффициент трения при высоких нагрузках снижается, а стальные поверхности не изнашиваются. При трении сдвиг поверхностей трения происходит внутри образующихся пленок по диффузионно-вакансионному механизму. При хорошо восстанавливающих свойствах смазочного материала можно для реализации ИП вводить закись или окись меди. Сервовитная пленка образуется в результате восстановления окислов меди в процессе трения.
2. В промышленности М.В. Голубом, а также Е.Н. Грискиным разработан ряд порошковых твердоспеченных материалов, работающих в режиме ИП. Шихта для твердоспеченного материала готовится из тонкодисперсных смесей порошков ВКЗ, ВК6, ВК8 или из указанных смесей с добавлением литого карбида вольфрама (WC+WC) зернистостью 0,1...0,25 мм в отношении 1:3. В качестве связующего материала применяют главным

образом медно- никелевые сплавы, которые обладают жидкотекучестью и обеспечивают высокую прочность порошкового материала. Порошковые материалы могут работать в режиме ИП при смазывании нефтью, нефтепродуктами и сточными водами. Сервовитная пленка образуется на поверхности твердых составляющих сплава в результате механического выдавливания мягкой составляющей и ее последующего растворения. Сплавы способны работать в одноименной паре (композиционный материал по композиционному материалу). Такое сочетание материалов работоспособно только благодаря образованию сервовитной пленки, которая обеспечивает смазывание твердых составляющих порошковой композиции. Эти составляющие без пленки меди не могут нести нагрузку, происходят задиры поверхностей.

3. Сервовитная пленка может образоваться при трении о сталь ПГФЭ, наполненного закисью меди при смазывании глицерином. Пленка образуется в результате восстановления закиси меди до чистой меди. При трении стальная поверхность покрывается сервовитной пленкой. Были исследованы антифрикционные композиции на основе эпоксифурановых олигомеров и медьсодержащих наполнителей в среде глицерина и углеводородных масел (МС-20), а также принципиально новые композиции, у которых образование легкоподвижных медных пленок в зоне трения возможно вследствие термического распада наполнителей, например фермиатта или силицилата меди. Повышение нагрузочной способности пары трения в присутствии органических солей объясняется тем, что медь, выделяющаяся в коллоидном состоянии в результате разложения указанных солей, под действием сил трения и высоких локальных температур находится в неокисленном виде; способна взаимодействовать с металлической поверхностью контртела и образовывать на ней тончайшую политуруобразную пластичную медную пленку.
4. Неожиданным было обнаружение сервовитной пленки меди на упорных подшипниках скольжения, применяемых в турбинах и турбокомпрессорах. Подшипник состоит из упорного стального гребня, закрепленного на вращающемся валу, и корпуса, внутри которого размещены по окружности плавающие подушки (сегменты). До последнего времени сегменты изготавливали из бронзы БрОФ 8,0-0,30 и на них наплавляли баббитовый слой толщиной несколько миллиметров. Такая конструкция известна под названием подшипников Митчеля и применяется издавна в упорных подшипниках скольжения.

Б.П. Кузовкин совместно с сотрудниками Института проблем материаловедения НАН Украины предложили наносить на поверхность бронзового сегмента бронзофторопласт из частиц сферической формы и пропитывать слой суспензией фторопласта 4Д с последующей калибровкой фторопластового слоя. При работе подшипника на слое фторопласта и сопряженной стальной поверхности образовывалась сервовитная пленка. В

результате длительных промышленных испытаний была установлена значительно большая износостойкость и надежность работы новых подшипников.

2.5. Постулаты классической трибологии и натуртрибологии

2.5.1. Классическая трибология

Еще в 1939 г. в СССР на 1-й всесоюзной конференции по трению и износу было высказано положение о том, что при рассмотрении пары трения, например вал–подшипник, нужно изучать триаду: материал вала, материал подшипника и смазочный материал. Развиваемая в дальнейшем проф. И.В. Крагельским молекулярно-механическая теория трения и изнашивания, рассматривала процесс изнашивания в виде трех стадий: 1) взаимодействия поверхностей, 2) изменения на поверхностях и 3) разрушение. Эта теория исходила также из того, что при трении происходит непосредственный контакт материалов деталей. Согласно И.В. Крагельского, взаимодействие материалов при трении может быть двух видов: механическое и молекулярное. Конечно, это нужно рассматривать условно, поскольку оба вида взаимодействия могут иметь место одновременно. Один материал влияет на изменение физико-химических свойств другого сопряженного с ним материала.

Одной из главных задач триботехники стало установление изменений свойств сопряженных поверхностей в процессе трения; именно от этого изменения будут зависеть величины износа и силы трения в соединении.

Появилось такое понятие, как приработка деталей. Это связано с тем, что при первоначальном контактировании трущиеся поверхности не могут нести эксплуатационные нагрузки, площадь их фактического контакта очень мала и появляется опасность схватывания, образования задиров и преждевременного выхода узла трения из строя. В процессе приработки на поверхностях трения происходят физико-химические изменения, которые в дальнейшем и определяют надежность и долговечность работы пары трения.

Появился также термин "приспособляемость". Авторы этого понятия утверждают, что каждый материал, работающий в узле трения, имеет свойство приспособляться к условиям работы: под действием сопряженного материала он упрочняется и становится более износостойким. Заметим, что понятия приработка и приспособляемость близки.

В последнее время в триботехнике появилось еще одно понятие, которое также относится к взаимодействию материалов пары трения. Это понятие "совместимость" одного материала с другим. Можно отметить, что, например, незакаленная сталь не может работать по закаленной стали, — такие материалы несовместимы. Незакаленный вал не может работать по бронзовому подшипнику, так же как хромированное поршневое кольцо по хромированному цилиндру. К терминам и понятиям приработка,

приспособляемость и совместимость добавим такие, как шероховатость, заедание, изнашивание, задиры, взаимное внедрение, взаимодействие поверхностей.

В инженерной практике имеется большое разнообразие материалов, применяемых в узлах трения, их сочетания могут быть весьма обширны. Если еще учесть то обстоятельство, что в процессе работы свойства материалов изменяются (в зависимости от условий трения и применяемых смазочных материалов, которых также имеются тысячи), то число физико-химических изменений на трущихся поверхностях и их интенсивность, от которых зависят величины износа и силы трения, может быть бесконечным и предусмотреть их все практически невозможно.

Достаточно, например, в алюминий-железисто-никелевой бронзе при 4% железа и 4% никеля увеличить содержание алюминия от 10 до 11%, как произойдет образование хрупких структур в сплаве, что резко снизит износостойкость пары бронза-сталь. Можно привести множество примеров, когда незначительное отклонение от технологического процесса изготовления деталей узлов трения приводило к образованию задиры на поверхностях трения и выходу деталей из строя.

Долговечность и безотказность узла трения, как уже было сказано, зависят от материалов двух сопряженных деталей и смазки. Выполнены и ежегодно выполняются тысячи научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, в числе которых:

- разработка новых износостойких и антифрикционных материалов и покрытий, а также смазочных материалов для узлов трения;
- изучение влияния шероховатости и волнистости поверхности первоначальный износ деталей узлов трения, надежность и энергетические затраты;
- определение оптимального состава конструкционных и анти-фрикционных материалов применительно к конкретным узлам трения машин и оборудования, которые обеспечивали бы минимальные потери на трение, высокую износостойкость и надежность работы;
- оценка совместимости различных материалов в парах трения с точки зрения схватывания поверхностей, переноса материала с одной поверхности трения на другую, их износостойкости и потерь на трение;
- исследование прирабатываемости материалов, продолжительности этого процесса, оценка оптимальных режимов приработки, возможности использования прирабочных покрытий, разработка различных технологических приемов и специальных прирабочных присадок к маслам и прирабочных масел;

- изучение изменений в поверхностных слоях трущихся деталей в результате действия пластической деформации, температуры и окружающей среды и влияние этих изменений на антифрикционные свойства пар трения;
- изучение различных видов изнашивания (окислительного, водородного, коррозионно-механического, фреттинг-коррозии и др.) и их закономерностей;
- изучение механизма разрушения поверхностей трения материалов при трении скольжения и контактной усталости материалов в подшипниках качения, зубчатых передачах и кулачковых механизмах, определение влияния различных факторов (твердости поверхности, вида финишной обработки, типа смазочного материала и др.) на контактную выносливость узла трения; разработка методик расчета трущихся деталей на трение и износ.

Естественно, этим не исчерпываются все направления по изучению процессов трения, изнашивания и смазки в машинах. Их большое разнообразие связано с тем, что в процессе работы узла трения, между трущимися материалами имеется непосредственный контакт.

С каждым годом разрабатываются все новые износостойкие и антифрикционные материалы и, для того чтобы оценить их служебные свойства, требуется проведение большого объема экспериментальных исследований. Изменения первоначальных свойств материалов в процессе эксплуатации машин практически непредсказуемы, и это не дает возможности заранее что-либо предвидеть. Налицо большое количество направлений исследовательских работ в области триботехники и, как результат, малая их эффективность. Возникает вопрос: как выйти из этого положения?

2.5.2. Понятие о натуртрибологии (самоорганизации в узлах трения)

Как было уже отмечено, обеспечение безыносной и длительной работы узла трения в настоящее время сводится к созданию между трущимися деталями металлической пленки, отделяющей одну поверхность от другой. В этом и состоит главная задача трибологии.

Исходя из изложенного, направление исследований по разработке безыносных узлов трения, моделирующих узлы, созданные природой, можно назвать натуртрибологией. Эти исследования в данное, время находятся на первой стадии развития.

В натуртрибологии на первый план выступают следующие исследования:

1. Создание условий в узле трения, при которых образуется сервовитная пленка:
 - разработка металлоплакирующих смазочных материалов и присадок к ним;

- разработка материалов, содержащих металлоплакирующий состав, обеспечивающий в процессе трения формирование сервовитной пленки;
 - разработка конструктивных решений (бронзовые вставки или специальные металлоплакирующие элементы в конструкцию узла трения), обеспечивающих образование сервовитной пленки.
2. Изучение смазочного действия сервовитной пленки в узле трения:
- образование комплексных соединений (металла с активными элементами смазочного материала), их разложение и образование вновь;
 - подбор наиболее рациональных комплексных соединений для различных классов узлов трения;
 - изучение образования комплексов, образующихся при взаимодействии металла (плакирующего элемента) с активными частями пластмасс.
3. Исследование структуры сервовитной пленки в зоне контакта деталей при ее деформации, длительности работы соединения в зависимости от вида смазочного материала, условий работы и среды:
- рентгеновские исследования строения сервовитной пленки и ее взаимодействия с активными элементами смазочного материала;
 - изучение диффузионных процессов при деформировании сервовитной пленки и их роли в обеспечении ее долговечности;
 - изучение структурных критериев явления ИП.
4. Изучение самоорганизующихся процессов в зоне фрикционного контакта:
- изучение диссипативной структуры поверхностного слоя при ИП;
 - изучение возбужденного состояния поверхности в результате выхода дислокаций и взаимодействия их со смазочным материалом;
 - исследование пластических деформаций поверхностного слоя при режиме ИП и их роли в растворении поверхности и диффузионных процессах.
5. Разработка новых технологических и эксплуатационных методов повышения долговечности машин и оборудования на основе ИП:
- разработка технологий и оснастки по использованию финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО-1) стальных и чугунных трущихся деталей машин;
 - разработка новых технологических процессов восстановления изношенных машин и оборудования без их разборки (ФАБО-2);

- оценка влияния методов ФАБО-1 и ФАБО-2 на повышение ресурса машин и оборудования, снижение расхода топлива и электроэнергии, уменьшения расхода смазочных материалов, объема смазочно-регулирующих работ в эксплуатации, сокращения времени приработки и снижения вредного выброса при работе двигателей внутреннего сгорания;
- расширение применения в качестве смазочного материала пресной и морской воды.

Различие между граничным трением и ИП представлено на рис.2.11 и рис.2.12.

Натуртрибологию можно отнести к самостоятельному направлению в области конструирования, изготовления и эксплуатации машин и оборудования. Отметим, что главным постулатом классической трибологии является то, что трущиеся материалы при работе все время между собой контактируют и находятся в состоянии насильственного контакта. В натуртрибологии главный постулат другой. Здесь трущиеся материалы не имеют непосредственного контакта между собой, их разделяют металлическая сервовитная пленка и серфинг-пленка, которые образуются в процессе трения.

2.6. Научные дисциплины, явления, термины и понятия, необходимые при изучении избирательного переноса

ИП (эффект безызносности) характеризуется сложными физико-химическими процессами, протекающими в зоне контакта трущихся деталей, и базируется в первую очередь на самоорганизации неравновесных процессов (формирование сервовитной металлической пленки), химии координационных соединений (взаимодействие смазочного материала с образовавшейся металлической пленкой) и физике тонких пленок (особая структура металлической пленки, разрядка дислокаций, растворение металла, диффузионные процессы).

Затронутый комплекс вопросов характеризуется физическим единством явления безызносности, что позволяет глубоко осмыслить и представить перспективу развития нового научного раздела в трибологии. При изучении ИП в технической литературе появились новые термины и понятия, например, такие как сервовитная пленка, ИП, металлоплакирующая смазка (металлоплакирующий смазочный материал), финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) и др. Другие термины менее известны – серфинг-пленка, трибо-ПАВ, континуальное трение и др.

Рассмотрим некоторые научные дисциплины и понятия, известные в науке как энтропия и синергетика, а также сформулируем явления и термины, необходимые при изучении ИП.

2.6.1. Энтропия

Энтропия (от греч. entropia – поворот, превращение) – мера неупорядоченности больших систем. Впервые понятие "энтропия" введено в XIX в. в результате анализа работы тепловых машин, где энтропия характеризует ту часть энергии, которая рассеивается в пространстве, не совершая полезной работы (отсюда определение: энтропия — мера обесценивания энергии). Затем было установлено, что энтропия характеризует вероятность определенного состояния любой физической системы среди множества возможных ее состояний.

В закрытых физических системах все самопроизвольные процессы направлены на достижение более вероятных состояний, т.е. к максимуму энтропии. В равновесном состоянии, когда максимум достигается, никакие направленные процессы невозможны. Отсюда возникла гипотеза о тепловой смерти Вселенной.

Однако распространение на всю Вселенную законов, установленных для закрытых систем, не имеет убедительных научных оснований. В XX в. понятие энтропии оказалось плодотворным для исследования биосистем, а также процессов передачи и обработки информации. Эволюция в целом и развитие каждого организма происходят благодаря тому, что биосистемы, будучи открытыми, питаются энергией от окружающего мира. Но при этом биопроцессы протекают таким образом, что связанное с ними "производство энтропии" минимально. Это служит важным руководящим принципом и при разработке современных технологических процессов. При работе узла трения в режиме безыносного трения энтропия практически не изменяется.

2.6.2. Синергетика

Понятие синергетика (от англ. synergetics – совместный), возникшее в середине 1970-х гг. – новое междисциплинарное направление научных исследований. Синергетика ставит задачей выявление и познание общих закономерностей, управляющих процессами самоорганизации в системах разной природы: физических, химических, биологических, технических, экологических и др.

Синергетика исследует весь комплекс явлений, специфических для переходов сложных систем от неупорядоченного состояния к упорядоченному и обратно. В настоящее время разработка этих проблем в рамках синергетики обусловлена различными подходами к проблеме самоорганизации в целом и особенностям рассмотрения конкретных вопросов.

Так, в работах И. Пригожина (Бельгия) и его сотрудников проблемы самоорганизации разрабатываются с позиции диссипативных структур, в основе которой лежат идеи, методы и принципы нелинейной термодинамики неравновесных процессов.

Синергетика в настоящее время выступает в качестве одного из важнейших источников нового метода научного мышления, необходимого для решения сложного комплекса разнообразных междисциплинарных задач, возникающих в связи с познанием и практическим овладением процессами самоорганизации, задачами, которые в настоящее время встают не только в естествознании, но и в технике и экологии.

2.6.3. Избирательный перенос при трении (эффект безызносности)

ИП – вид трения, который обусловлен самопроизвольным образованием в зоне контакта тонкой неокисляющейся металлической пленки с низким сопротивлением сдвигу и не способной накапливать при деформации дислокации. На пленке, образуя с ней химическую связь, может происходить образование координационных соединений из продуктов механической деструкции углеводородов смазки, создавая дополнительный антифрикционный слой. Эта пленка повышает износостойкость поверхности (до двух порядков) и снижает силы трения (на порядок) по сравнению с аналогичными условиями трения при граничной смазке. Для нее характерен нелинейный режим взаимодействия вакансий и дислокаций – вакансионно-дислокационный механизм сдвига, задаваемый повышенной концентрацией вакансий при ИП упрочненных участков поверхности в процессе трения.

При некоторой критической концентрации вакансий в пленке происходит переход от консервативного движения дислокаций к их неконсервативному переползанию к поверхности и выходу на нее. Дислокации переходят на другой уровень взаимодействия с кристаллической решеткой металла с существенно меньшими затратами энергии, что сопровождается релаксацией напряжений.

Поскольку при эффекте безызносности трение сопровождается эволюционными процессами – образованием металлической пленки на трущихся поверхностях, то главным в этом случае становится самоорганизующийся характер трения, который обусловлен обменом трущейся пары с внешней средой энергией и веществом, а также коллективным поведением ионов металла, из которых формируется металлическая пленка. Она представляет собой металл в особом состоянии, имеющем место только в процессе трения. Трение не может уничтожить пленку, так как оно ее воспроизводит.

Пленка при трении образуется из одного из материалов деталей, участвующих в трении (бронзы, латуни или другого медного сплава), или же из смазочного материала, содержащего порошки пластичных металлов, их соли, комплексные соединения металлов, металлоорганические соединения.

2.6.4. Вакансионно-дислокационный механизм при избирательном переносе

При исследовании прочности и пластичности поверхностных слоев металлов В.П. Алехиным был установлен диффузионно-вакансионный механизм. Сущность этого механизма в области низких (комнатных) температур и напряжений заключается в том, что в поле приложения напряжений и действия некоторых других условий (например, отсутствия окисных пленок и др.) изменяется химический потенциал точечных дефектов (вакансий и междоузлий), и в материале спонтанно возникают противоположно направленные диффузионные потоки вакансий и атомов.

Однако при этом возникает дислокационный барьер, мешающий действию механизма. Избирательное растворение в режиме ИП снимает барьер, действуя совместно с полем приложенных напряжений. Дислокации, выходя на поверхность, делают систему ИП открытой благодаря химической реакции "свободных" атомов с лигандами смазки. Свободные атомы возникают в местах выхода дислокаций. Периодическое упрочнение и разупрочнение пленки создает циклическую накачку вакансий, а циклическое растворение свободных атомов приводит к образованию смазочного слоя из координационных соединений. В режиме ИП действует вакансионно-дислокационный механизм.

2.6.5. Конфигурационная энтропия металла

При трении не только происходит диссипация энергии в виде теплоты, электричества и др., но и запасается в поверхностном слое в виде скоплений легирующих элементов и дислокаций, что можно характеризовать как увеличение конфигурационной энтропии. Избирательное растворение поверхности медного сплава при ИП облегчает выход дислокаций на поверхность и уменьшает образование конфигурационной энтропии. Чтобы оценить структуру пленки в этом отношении, был разработан рентгеновский метод ее исследования, который позволил определить границы действия вакансионно-дислокационного механизма.

2.6.6. Линейные и нелинейные системы

При трении в режиме граничной смазки создаются условия, которые диктуют системе поверхностного слоя линейный режим изменений — это линейное возрастание плотности дислокаций. Подобное состояние достаточно близко к равновесному, обладает устойчивостью и в сильной степени неупорядочено. В этом режиме имеется симметрия относительно обращения времени, и в устойчивом состоянии скорость производства энтропии минимальна. Поэтому спонтанные флуктуации не могут привести к эволюции системы в сторону повышения устойчивости и упорядоченности.

Иная ситуация возникает, когда отклонение от равновесия велико и не описывается линейным законом. Вынужденное отклонение от равновесия при

ИП осуществляется путем создания некоторой концентрации атомов (дислокаций), которая благодаря изменившемуся химическому потенциалу пленки вызывает ее избирательное растворение и понижает уровень энтропии. В результате неравновесные концентрации вакансий и дислокаций изменяются во времени по периодическому закону вокруг постоянного значения и возникает пространственно-временная структура "вакансионно-дислокационных волн".

Эта нелинейная структура сохраняется все время, пока имеет место деформирование пленки и ее избирательное растворение. В основе этой структуры лежит кинетический фазовый переход от консервативного движения дислокаций к их неконсервативному переползанию к поверхности в условиях высокого насыщения вакансиями.

2.6.7. Переползание дислокаций

При граничном трении в поверхностном слое деталей постепенно происходит накопление дислокаций, которые в дальнейшем объединяются, образуют трещины, и в результате происходит изнашивание поверхности. Наличие на поверхности окисных пленок, отсутствие растворения поверхностного слоя способствуют накоплению дислокаций и это увеличивает конфигурационную энтропию. Механизм переползания дислокаций в тонком поверхностном слое при деформировании в научной литературе известен как вакансионно-диффузионный механизм и исследовался рядом авторов (С.Н. Журков, И.А. Одинг, В.С. Иванова, Е.Д. Щукин и др.).

Это явление преимущественного пластического течения в поверхностных слоях кристалла в начальных стадиях его деформирования. Однако в дальнейшем в результате деформационного упрочнения и наличия окисных пленок создается барьер для выхода дислокаций на поверхность и процесс течения металла затормаживается.

При ИП поверхностный слой трущейся детали не имеет окисных пленок и поверхность растворяется, что снимает барьер для выхода дислокаций. Кроме того, в процессе избирательного растворения образуется поверхностно-активное вещество, пластифицирующее металл и уменьшающее объем деформируемого слоя до размеров микронной толщины.

В этой пленке диффузионные процессы возрастают во много раз, что создает гомогенную структуру и увеличивает концентрацию вакансий в деформируемом слое. Все это вызывает кинетический фазовый переход от консервативного движения дислокаций к переползанию. В этом случае под действием осмотических сил дислокации движутся перпендикулярно к поверхности и легко разряжаются. Конфигурационная энтропия не накапливается.

2.6.8. Трибо-ПАВ

Трибо-ПАВ – это поверхностно-активные вещества, образующиеся при избирательном растворении и каталитических процессах трибодеструкции смазочного материала в процессе трения.

2.6.9. Диссипативная система

Диссипативная система – это динамическая система, у которой полная механическая энергия (т.е. сумма кинетической и потенциальной энергий) при движении непрерывно уменьшается (рассеивается), переходя в другие, немеханические формы энергии (например, в теплоту). При трении механическая энергия переходит в тепловую, тратится на пластическую деформацию, образование дефектов, упрочнение поверхностного слоя, его диспергирование (продукты износа) и др. Практически все системы, с которыми приходится реально сталкиваться в земных условиях, являются диссипативными системами.

Диссипативные системы не следует отождествлять с неконсервативными системами, в которых возможна не только диссипация энергии, но и приток энергии извне. Поэтому, например, в неконсервативных системах могут иметь место такие явления, как автоколебания, возникающие при равенстве расхода и притока энергии, что в диссипативных системах невозможно.

2.6.10. Диссипативная структура

Диссипативная структура – это пространственная или пространственно-временная структура, сохраняющаяся и циркулирующая неопределенно долго во времени, для чего, кроме известных условий, требуется постоянная подача энергии и вещества. Диссипативная структура является открытой, стационарной, обратимой, неравновесной, бесфинальной структурой, образующейся в гомогенной среде.

Характеризуя открытую систему диссипативной структуры, итальянский физик Дж. Карери пишет: "Открытой системой мы будем называть систему, способную к обмену энергией и веществом с окружающей средой так, что потоки, входящие в систему и выходящие из нее, могут сместить ее состояние термодинамического равновесия и удержать вдали от него". Например, в систему поступает химическое вещество с большим запасом свободной энергии, а покидают ее продукты с более бедной энергией. Диссипативная структура поэтому должна состоять из встречных диффузионных потоков, реагирующих между собой в неравновесном состоянии, например атомов и вакансий.

2.6.11. Условия возникновения диссипативной структуры

Из работ И. Пригожина, В. Эбелинга следует, что когерентное, согласованное поведение материала, приводящее к возникновению

диссипативных структур, возможно лишь при наличии особых условий и взаимодействий:

1. Большое отклонение от равновесия;
2. Реализация принципа эволюции Пригожина–Гленсдорфа;
3. Нелинейность основных процессов;
4. Кооперативное поведение подсистем;
5. Отбор и спонтанная самоорганизация в макромолекулярных системах;
6. Постоянный поток отрицательной энтропии;
7. Открытость системы для обмена веществом и энергией.

Ни одно из этих условий не соблюдается при трении с граничной смазкой. Явления, которые происходят в поверхностном слое металла, здесь идут линейно вблизи равновесия – имеется в виду накопление дислокаций. Однако создавать эти условия не пришлось – ИП обнаружили в готовом виде. Когда это произошло, развитие теории трения и износа поднялось на следующую более высокую ступень.

2.6.12. Неравновесность системы

Примером типичной неравновесности системы является состояние обычного потока газа, когда его плотность, гидродинамическая скорость и температура меняются от точки к точке. Существование градиентов этих параметров приводит к переносу массы, импульса и энергии. Возникающие процессы переноса стремятся выровнять неоднородности в распределении плотности, скорости и температуры системы, приближая ее к равновесию.

Процессы переноса характеризуются соответствующими потоками. Например, градиент температуры выравнивает поток теплоты, градиент плотности – поток массы. В общем случае говорят, что потоки вызываются обобщенными термодинамическими силами (градиенты температуры или концентрации – простейшие примеры термодинамических сил). Следует иметь в виду, что обобщенные термодинамические силы не имеют ничего общего с силами в ньютоновском понимании этого термина.

При трении в режиме ИП в качестве термодинамических потоков рассматриваются диффузионные потоки атомов, дефектов структуры, возникающие в защитной пленке при ее упрочнении и разупрочнении. Неравновесность этих потоков поддерживается градиентами их плотности, концентрации и температуры и регулируется обратной связью, возникающей в результате изменения химического потенциала пленки.

2.6.13. Кооперативные явления в системе

Из неравновесной термодинамики следует, что, удаляясь от равновесного состояния, движение идет в сторону специфического и уникального. Вблизи состояния равновесия материя имеет много общих свойств. Вдали от него встречаются разнообразные структуры. При наличии цепочки неустойчивостей число путей к различным состояниям резко возрастает. При слабом отклонении от равновесия эволюция рано или поздно приводит к конечному результату (разрушению). Для открытых систем при значительном отклонении от равновесия ситуация иная. Если повышать степень неравновесности внешних условий, то будем иметь цепочку упорядоченных структур с постоянным уменьшением энтропии – кооперативные явления.

При ИП создается взаимодействие как макроскопических элементов – факторы снижения трения и износа, внешняя самоорганизация, так и кооперативное взаимодействие микроскопических элементов – атомов, вакансий, дислокаций. Когда частицы устанавливают связь друг с другом на микроскопических расстояниях через макроскопические интервалы времени, имеет место внутренняя самоорганизация.

2.6.14. Лиганды, комплексные соединения, координационная теория

Лиганды – молекулы или ионы, связанные с центральным ионом в комплексном соединении. Комплексные соединения – соединения или ионы, которые образуются в результате присоединения к данному атому (или иону) нейтральных молекул или других ионов. Комплексные соединения многообразны и многочисленны.

Координационная теория – теория комплексных соединений, согласно которой в молекуле любого комплексного соединения один из атомов (ионов), обычно положительно заряженный, занимает центральное место и называется комплексообразователем. Вокруг него в непосредственной близости расположено (координировано) некоторое число противоположно заряженных ионов или электронейтральных молекул, называемых лигандами, которые образуют внутреннюю координационную сферу соединения. Остальные ионы, находящиеся на более далеком расстоянии от центрального иона, образуют внешнюю координационную сферу.

2.6.15. Открытая система избирательного переноса

При ИП в процессе деформирования сервовитной пленки образующиеся дислокации не накапливаются в ней, а под действием осмотических сил переползают к поверхности. В местах выхода дислокаций на поверхности возникает зона возбужденных атомов (атомы со свободными химическими связями) из-за образования "ступеньки" в месте выхода "ядра" дислокации.

Продукты трибодеструкции смазки или специально добавленные в смазочный материал активные частицы – лиганды вступают в химическое взаимодействие с возбужденными атомами и последние теряют связь с металлом пленки. Энергия деформирования через возбужденные атомы переходит в химическую связь и не накапливается в пленке. Это явление А.А. Поляковым было названо скин-эффектом. Скин (англ. skin) – «сдирать кожу». Таким образом, конфигурационная энтропия поддерживается на низком уровне. Возникающее комплексное соединение образует ассоциаты – отдельные молекулы, которые создают смазочные пленки, адсорбированные на металлической (сервовитной) пленке. Благодаря нестабильности комплексного соединения часть его молекул снова распадается на лиганд и ион металла. Электрофоретические силы могут увлечь ион в зону контакта, и там он коагулирует с пленкой. Таким образом, может осуществляться обмен веществом с внешней средой.

2.6.16. Сервовитная пленка

Защитная металлическая пленка самопроизвольно образуется в зоне контакта трущихся деталей в режиме ИП. Пленка имеет особую структуру (в ней много вакансий и мало дислокаций), находится под воздействием трибо-ПАВ и подвергается вакансионно-дислокационному механизму.

2.6.17. Серфинг-пленка

Это защитная адсорбированная пленка на основе ассоциации комплексных соединений, образующихся в результате перехода "свободных" атомов в местах выхода дислокаций в химическое соединение с лигандами смазочного материала, обеспечивает легкое скольжение при трении.

2.6.18. Металлоплакирующий смазочный материал

Термин появился в 1962 г. в связи с изобретением смазочного материала, реализующего эффект ИП (А.с. № 179609 от 14 мая 1962 г. авторы Д.Н. Гаркунов, В.Г. Шимановский, В.Н. Лозовский).

Это класс смазочных материалов, содержащих (от 0,1 до 3% мас. и более) присадки: порошки металлов, сплавов и их окислов, соли и комплексные соединения металлов, металлоорганические соединения. При использовании металлоплакирующей смазки реализуется эффект ИП, который проявляется в том, что на трущихся поверхностях деталей в процессе трения формируется пленка, трудно поддающаяся окислению. Пленка состоит из металлов, введенных в смазочный материал. Толщина пленки составляет от нескольких атомных слоев до 1...2 мкм и более. Пленку называют сервовитной. Металлоплакирующие смазки применяют в тяжело нагруженных узлах трения качения и скольжения самолетов, автомобилей, текстильном и швейном оборудовании, металлургическом оборудовании, морском флоте и др. Использование металлоплакирующих смазочных материалов позволяет

повысить долговечность узлов трения (в 2–3 раза), снизить потери на трение (в 2 раза) и тем самым повысить КПД машин и оборудования, уменьшить расход смазочных материалов (в 2–3 раза), увеличить период между смазочными работами (до 3 раз).

Наибольшее распространение получили металлолакирующие смазочные материалы, образующие медную, оловянную или свинцовую сервоитные пленки.

2.6.19. Понятие о финишной антифрикционной безабразивной обработки

ФАБО – процесс нанесения защитной металлической пленки на стальную или чугунную поверхность. Покрытие находится в напряженном состоянии, способном при воздействии активного смазочного материала подвергаться избирательному растворению и создавать сервоитную пленку.

Сущность процесса состоит в том, что стальные или чугунные детали после традиционной окончательной обработки их поверхности (резанием, шлифованием, хонингованием) покрывают тонким слоем (1... 4 мкм) латуни, меди или бронзы. Покрытие производят путем трения латунного, медного или бронзового прутка (инструмента) о поверхность детали, смазывая при этом поверхность трения технологической жидкостью. При трении материал инструмента переносится на стальную (или чугунную) поверхность детали.

Процесс переноса металла при трении ранее считался вредным явлением, поскольку он сопровождался интенсивным изнашиванием и повреждением трущихся поверхностей, особенно при сухом трении. При смазывании маслом этот процесс происходил в меньшей степени, лишь в отдельных местах контакта. Здесь большую роль играют окисные пленки, возникающие в зоне контакта и препятствующие непосредственному соприкосновению материала детали с инструментом.

Для того чтобы наносимый слой латуни был сплошным и ровным, необходимо, чтобы поверхность детали не имела окисных и масляных пленок, а материал латуни пластифицировался ПАВ в процессе нанесения покрытия. Давление прутка должно обеспечить полное прилегание инструмента к поверхности детали. При таких условиях перенос материала с инструмента на деталь происходит сплошным слоем, состоящим из очень мелких частиц, хорошо сцепленных с поверхностью обрабатываемой детали и между собой.

2.6.20. Континуальное трение

Это трение двух твердых тел при наличии на поверхностях трения сервоитной или другой пластичной металлической пленки, покрывающей выступы шероховатости поверхностей. При таком трении площадки контакта плоские, и трение происходит без ударов шероховатостей – оно непрерывно.

2.6.21. Бифуркация

Бифуркация (от лат. *bifureus* – раздвоенный) в термодинамике означает возникновение новой устойчивой ветви решения. Это происходит при переходе за критическое значение термодинамических потоков и сил. Например, при фазовых переходах скачкообразно возникают новые структуры с другими свойствами.

Рассмотрим процесс, вызывающий систематическое отклонение от равновесия, например увеличение концентрации термодинамических потоков и сил на границах фазовых переходов. Пусть изменение концентрации происходит в соответствии с рис. 2.12.

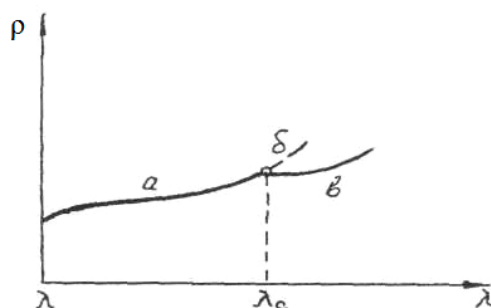


Рис. 2.12. Ветвление решения по мере удаления от равновесия:

λ – изменение некоторого характеризующего состояния; ρ – качественное изменение концентрации

Согласно теореме о минимальном производстве энтропии, близкие к равновесию стационарные состояния асимптотически устойчивы (ветвь *a*). В силу непрерывности эта ветвь, называемая термодинамической, простирается в конечной окрестности равновесного состояния. Однако после некоторого критического значения *a* при λ_c , не исключена возможность того, что термодинамическая ветвь станет неустойчивой (ветвь *б*). В этом случае ничтожно малое возмущение уводит систему с термодинамической ветви. Новый устойчивый режим, устанавливающийся в системе, может соответствовать упорядоченному состоянию (ветвь *в*). Тогда можно сказать, что произошла бифуркация, при которой возникла новая ветвь решений.

2.7. Структура сервопитной пленки

Свойства медной пленки, "рожденной" в процессе трения, иные, чем у обычной меди, полученной восстановлением медных руд. Это различие обязано условиям образования пленки. Так, в узлах трения домашнего холодильника пленка меди образуется из ионов меди, поступающих в смазочный материал из медных трубок охладителя. Образуется она только в зоне трения при наличии смазочного материала и при невысокой температуре. Механизм ее формирования еще недостаточно выяснен, хотя свойства исследованы многими современными методами.

При трении пары бронза–сталь в среде глицерина пленка на поверхностях трения образуется в результате распада медного сплава (твердого раствора) при низких температурах, смазочный материал и сдвиговые деформации облегчают диффузионные процессы, чего нет при выплавке меди из руды. На первый взгляд, казалось бы, трение может только препятствовать процессу кристаллизации пленки (большие удельные нагрузки, сдвиговые деформации, вспышки температур). Однако электрохимические силы здесь превалируют над механическими силами – пленка образуется и в этих стесненных условиях. Структуру пленки исследовали различными методами.

2.7.1. Исследования на электронном микроскопе

Пленку меди на стали и на бронзе, образовавшуюся при трении бронзы о сталь в среде глицерина, изучали на электронном микроскопе ЭМ-7. На фотографии поверхности пленки, полученной при помощи угольно-серебряных реплик (рис. 2.13), видно, что сервовитная пленка имеет микропористость, причем некоторые поры имеют огранку. Это так называемые отрицательные кристаллы, которые образуются в результате коагуляции (слияния) вакансий, в избытке имеющихся в пленке.

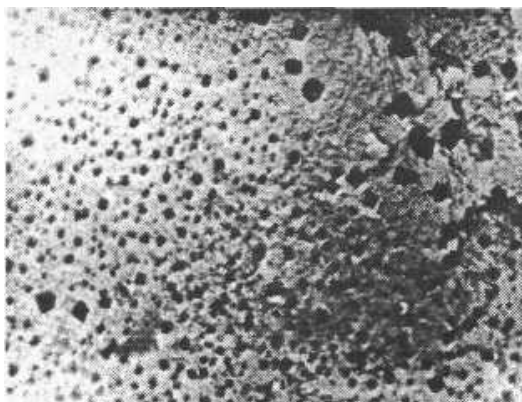


Рис. 2.13. Участок защитной пленки, образовавшейся при избирательном переносе на бронзе БрАЖМц (x15000)

Таким образом, исследование пленки на электронном микроскопе показало, что пленка толщиной 1...2 мкм имеет рыхлую, пористую структуру. Этот вывод подтверждает следующий опыт. Тщательно промытый и высушенный образец с медной пленкой на поверхности выдерживали в вакуумном шкафу. В результате на поверхности "выпотевал" глицерин, появление которого свидетельствовало, что в пленке находились поверхностно-активные компоненты смазочного материала.

2.7.2. Рентгеноструктурный анализ

Для более глубокого изучения структуры сервовитной пленки Л.М. Рыбакова и Л.И. Куксенова разработали метод исследования тонких поверхностных слоев с использованием "скользящего" пучка рентгеновских лучей. Метод позволяет без разрушения поверхности проводить послойный

анализ исследуемых материалов путем только изменения угла между лучом и отражающей поверхностью. Изменяя угол λ , можно получить информацию о состоянии слоев материала разной (заданной) толщины (рис. 2.14).

При $\lambda \rightarrow 0$ толщина анализируемого слоя уменьшается, достигая малого значения при $\lambda = 10...30'$ (в зависимости от длины волны рентгеновских лучей X , и плотности материала). Указанные значения угла λ являются предельными. При меньших значениях λ наблюдается явление полного внешнего отражения, не позволяющего получить интерференционную картину рентгеновских лучей от исследуемого материала.

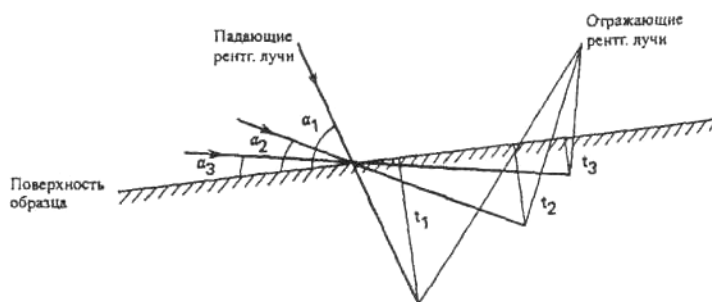


Рис.2.14. Схема анализа поверхностного слоя различной толщины методом скользящего пучка рентгеновских лучей

Для того чтобы получить информацию от слоев металла малой толщины и проводить послойное исследование с заданным шагом (сканирование по глубине), необходимо иметь узкий пучок лучей малой расходимости. Для этого авторы данного метода создали рентгеновскую камеру со специальным коллимационным устройством, которое обеспечивает формирование узкого и практически параллельного пучка рентгеновских лучей, падающих на исследуемую поверхность образца.

Коллективом ученых под руководством Л.М. Рыбаковой разработана рентгеновская камера, которая позволила исследовать пластически деформированные слои металла на глубине до 0,1 мкм. Далее рассмотрены результаты анализа интерференционной картины на рентгенограммах, полученных при послойных съемках скользящим пучком рентгеновских лучей меди и ее сплавов, трение которых протекало в условиях ИП. Особое внимание уделялось изменениям в тонких поверхностных слоях, измеряемых долями микрометра, и которые ранее в связи с отсутствием соответствующих методов для их анализа выпадали из поля зрения исследователей.

Пластическая деформация сервовитной пленки. Дислокационная и вакансионная структуры. Разработанный метод позволил определить ширину интерференционной линии (рис. 2.15). Рентгенограмма содержит информацию о размерах блоков мозаики (единицы структуры, когерентно рассеивающей рентгеновские лучи) и микродеформации кристаллической решетки металла. Таким образом, величина β отражает один из основных процессов в металле,

связанных с развитием дислокационной структуры в ходе пластической деформации и обуславливающих, в конечном итоге, разрушение поверхностных слоев.

Характер изменения величины β -поверхностного слоя образца, работающего в условиях ИП, оказался неожиданным. Если при обычном трении ширина линий к поверхности возрастает 1 (на рис 2.15, б), указывая на увеличение степени пластической деформации под влиянием действующего в контакте давления, то в условиях ИП она падает 2.

На рис. 2.15, а представлены результаты изменения ширины интерференционных линий в функции времени испытания в слоях различной толщины меди, которое проводилось на машине трения с возвратно-поступательным движением с постоянной нагрузкой и скоростью. Контртелом служила сталь 45, смазочной средой был глицерин. Эта пара трения реализовала эффект безызносности. Как видно, изменение β происходит в основном в поверхностных слоях, прилегающих к свободной (несущей) поверхности, т.е. в очень тонких слоях, измеряемых долями микрометра. И как следует из экспериментальных данных, уширение линий в функции времени испытания для этих слоев постепенно падает и в установившемся режиме β в 1,6 раза меньше, чем в процессе приработки. Кроме того, по глубине образцов из меди β изменяется монотонно (рис. 2.15, б).

Сначала полученные экспериментальные данные вызвали недоумение: ширина линий на рентгенограмме поверхностных слоев вместо того чтобы расти в зависимости от степени пластической деформации, обусловленной трением (кривая 1, рис. 2.15, б), уменьшалась до нулевого значения (кривая 2).

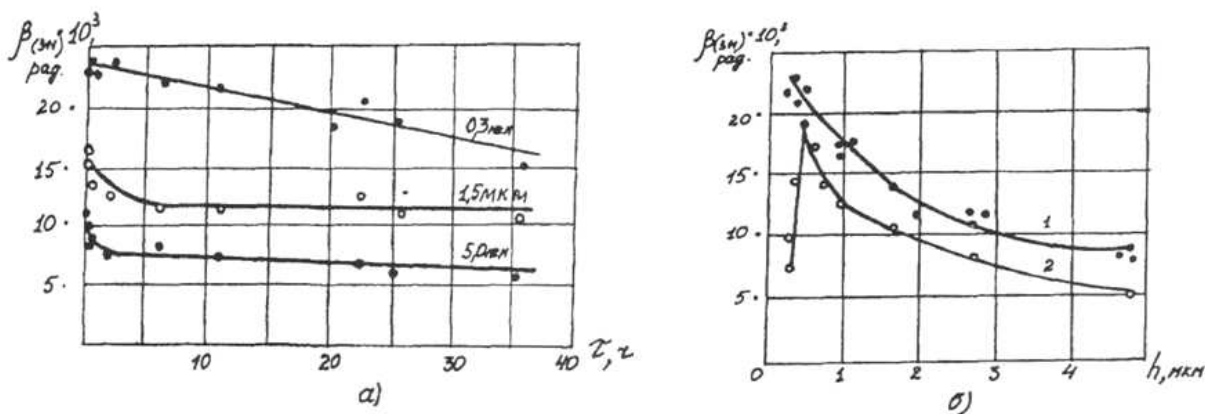


Рис. 2.15. Изменение физического уширения рентгеновских линий на различной глубине поверхностного слоя в зависимости от времени испытаний (а) и глубины деформации (б) при обычном трении (кривая 1) и трении в режиме ИП (кривая 2)

Такую зависимость Л.М. Рыбакова объясняет действием эффекта пластифицирования – эффекта Ребиндера, который заключается в облегчении перемещения и размножения дислокаций, облегчении выхода дислокаций и

снижения их плотности на наружной поверхности в присутствии ПАВ в смазке. Этот процесс происходит в слое металла, примыкающем к поверхности, и по толщине соизмерим со средней длиной дислокационных сегментов в кристалле. Именно от этих слоев, непосредственно взаимодействующих со смазочной средой и составляющих доли микрометра, была получена информация.

Таким образом, авторами разработанного метода исследования поверхностных слоев при трении впервые экспериментально было показано первичное влияние ПАВ смазки на структурное состояние трущегося материала. Отсутствие размытия интерференционных линий на рентгенограмме свидетельствует о том, как пишет Л.М. Рыбакова, что плотность дислокаций в поверхностном слое при режиме ИП на 2–3 порядка ниже, чем у материала, трущегося в обычных условиях.

Подвижность точек выхода дислокаций под действием ПАВ смазки приводит к их разрядке. Интенсивность последней усиливается наличием большого количества вакансий, образовавшихся вследствие ИП атомов кристаллической решетки, сопровождающего процесс трения при ИП.

Процесс разрядки дислокаций настолько интенсивен, что интерференционные линии на рентгенограмме не только не показывают радиального размытия, но на них просматриваются отдельные пятна. Они свидетельствуют о формировании относительно больших по размеру областей металла, полностью свободных от искажений кристаллической решетки.

Обычно подобные интерференционные пятна наблюдаются при рентгено съемке отожженного после деформации металла, в процессе его рекристаллизации. Оценка размера областей, свободных от искажений, в данном случае показала, что они возрастают в функции времени испытания почти на порядок (рис 2.16).

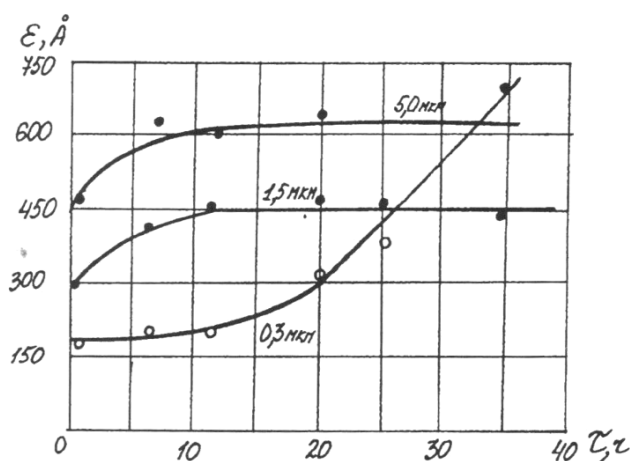


Рис. 2.16. Зависимость размера блока мозаики кристаллической решетки меди в слоях различной толщины от времени испытания при трении в условиях ИП

Полученные экспериментальные данные позволяют заключить, что высказанное ранее предположение о действии эффекта пластификации при ИП нашло свое обоснование и экспериментальное подтверждение.

Диффузионные процессы и параметр решетки. Вторым важным вопросом при изучении структуры ИП является процесс диффузии. В результате диффузии атомов кристаллической решетки происходит перераспределение элементов, составляющих сплав, изменение степени легирования по глубине поверхностных слоев, уход (растворение) элементов с поверхности, внедрение чужеродных атомов в кристаллическую решетку основного металла или, напротив, образование пустых мест (вакансий) в кристаллической решетке и др.

Все эти факторы влияют на интерференционную картину, формирующуюся при рентгено съемке. В первую очередь они оказывают влияние на положение интерференционных линий — происходит сдвиг линий относительно их теоретического положения, вызванный соответствующим изменением параметра λ кристаллической решетки металла.

Анализ местоположения линий на рентгенограммах, полученных от слоев металла разной толщины, позволил сделать следующие выводы. При трении медного сплава в условиях ИП происходит обеднение поверхностных слоев легирующими элементами при этом параметр λ к поверхности уменьшается (рис. 2.17). Более того, как пишет Л.М. Рыбакова, процесс растворения атомов сопровождается формированием на поверхности сплава новой металлической фазы с границей раздела с основным металлом.

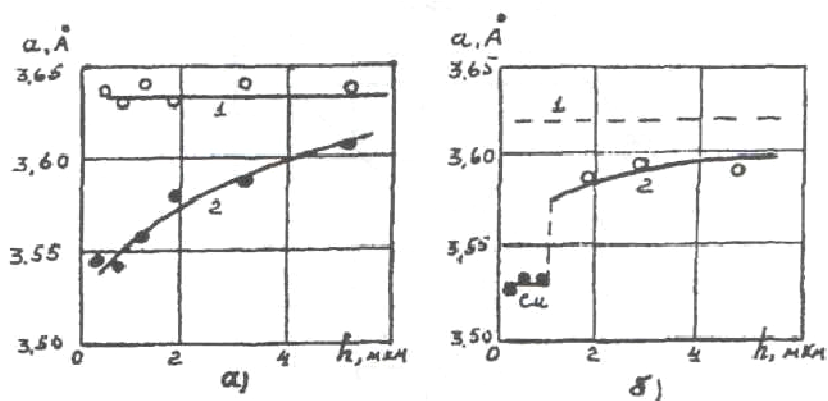


Рис. 2.17. Изменение периода a кристаллической решетки латуни Л90 (а) и бронзы БрАМЦ 9-2(б) при трении в условиях ИП:

1 – исходное состояние; 2 – после трения

Основанием для такого утверждения служат рентгенограммы, полученные при малом угле скольжения первичного пучка рентгеновских лучей от $0,5$ до 1° .

Анализ рентгенограмм показал, что эта пленка является металлической и имеет систему интерференционных линий, характеризующую ее принадлежность к меди.

Триботехнические испытания на машине трения с возвратно-поступательным движением (77МТ-1) показали, что режим безызносности реализуется лишь в случае оптимального количества возникающих в цикле трения линейных и точечных дефектов кристаллической решетки металла (рис. 2.18).

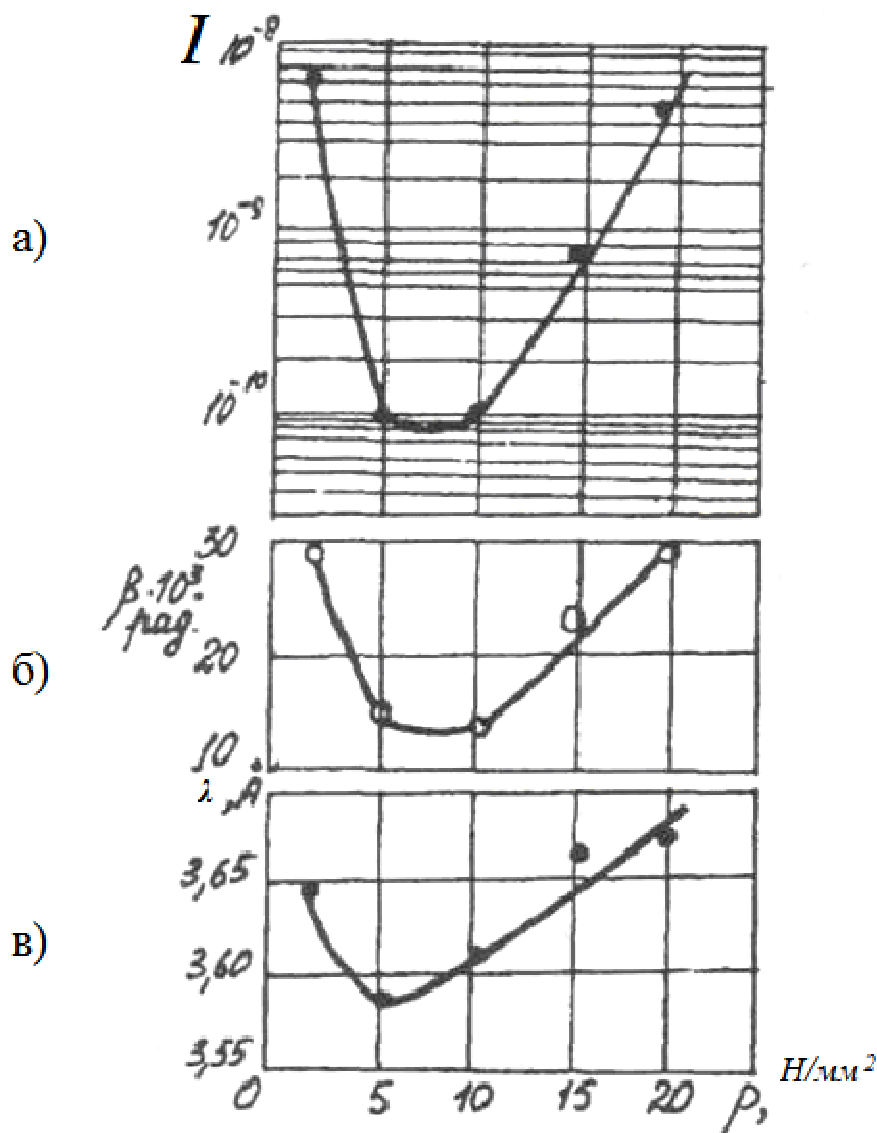


Рис. 2.18. Зависимость интенсивности изнашивания I (а), физического уширения рентгеновской линии β (б) и периода кристаллической решетки λ (в) сплава БрА5 от удельной нагрузки ρ при трении в масле АУ

Отклонение от оптимального соотношения дефектов нарушает режим трения, вызывая либо повышенную плотность дислокаций, которая приводит к разрушению поверхностных слоев, либо к усиленному растворению трущегося

металла – его коррозии. Следовательно, эффект безызносности можно реализовать только при сочетании определенных материалов, смазки и внешних параметров (нагрузки, скорости, температуры, кинематики движения).

Обобщающие результаты закономерностей структурных изменений, диффузионного перераспределения легирующих элементов по глубине трущегося материала в смазочных средах разной природы подробно рассмотрены далее.

Результаты исследований, полученные радиоизотопным анализом и методом ожеспектроскопии подтвердили данные о перераспределении легирующих элементов сплава при трении. Они указывают на резкое различие в содержании легирующих элементов в поверхностных слоях (вплоть до полного их растворения при формировании сервовитной медной пленки) при разных условиях трения, в частности, при использовании смазочных сред разной природы.

Послойный эмиссионный микроспектральный анализ (с использованием лазерного луча) показал, что под сервовитной пленкой на границе со сталью имеется слой оксидов меди, легирующих элементов или примесей толщиной около 0,1 мкм.

Физико-химические исследования структуры сервовитной пленки дали основание высказать предположение, что материал пленки находится в состоянии, подобном расплавленному. Она не способна к наклепу, имеет малые сдвиговые усилия, пориста. Пленка в поверхностной части не имеет окислов, способна к схватыванию, при трении ее частицы могут переходить с одной поверхности на другую, т.е. схватываться без образования повреждений и увеличения сил трения. Пленка может играть роль твердой смазки. Трение бронзы о сталь в условиях ИП можно уподобить скольжению тела по льду, при котором низкий коэффициент трения вместо воды обеспечивает пленка расплавленного металла.

2.8. Физические основы (факторы) эффекта безызносности (избирательного переноса)

2.8.1. Общие сведения

Анализ физических процессов при ИП проводился в сравнении с процессами, происходящими при граничном трении — наиболее изученном и широко распространенном в узлах трения машин и механизмов. Как известно, при граничном трении основными факторами, определяющими износ поверхностей трения, являются:

- пластические деформации, приводящие к наклепу поверхностей и разрушению микронеровностей;

- окислительные процессы: образующиеся при трении окисные пленки, хотя и препятствуют схватыванию и глубинному вырыванию, хрупки и быстро разрушаются;
- внедрение отдельных участков поверхности одной детали в сопряженную поверхность другой, что при скольжении вызывает образование неровностей поверхностей и при многократном воздействии их разрушение;
- адгезионное схватывание, приводящее к переносу материала одной детали на другую и усиление изнашивания;
- наводороживание поверхностей трения деталей, что ускоряет изнашивание в зависимости от условий работы трущихся деталей более чем на порядок.

В связи с отмеченными факторами, защита от износа должна быть многофакторной, вероятно, в некотором соответствии с перечисленными выше явлениями. Заметим, что применение для защиты от изнашивания только смазки хотя и предохраняет от схватывания (не всегда надежно), но не спасает от взаимного внедрения неровностей, пластического деформирования, окисления и разрушения окисных пленок и других необратимых процессов.

Если обратиться к биологическим процессам живых организмов, то для них характерным является многократное перекрывание и дублирование жизненно важной функции. В области же износа деталей машин имеется явная недостаточность предохранения и компенсации износа. Подтверждением недостаточности "однофакторного" подхода является то, что разработка в течение многих десятилетий огромного числа различного рода смазочных материалов и присадок к ним с целью снижения износа хотя и достигла эффективных результатов, но не дала возможности существенно поднять ресурс машин и механизмов. Одно только усиление адсорбционной (или хемосорбционной) защиты от адгезии в виде слоя смазки толщиной 0,1 мкм (что имеет место при граничном трении) не в состоянии устранить ни усталостные процессы, ни элементарное деформирование выступов шероховатостей.

Разрушение поверхностей деталей, как показал еще Л.В. Елин [1], может происходить и без разрыва тонкой пленки смазки в результате многократного взаимодействия шероховатостей поверхности. Переход к гладкой поверхности при граничной смазке вызывает масляное голодание и схватывание в зоне контакта.

При ИП защитные системы построены по принципу избыточности, так как сервоитная пленка поглощает деформацию, а внедрение неровностей практически отсутствует. Впадины между выступами шероховатостей поверхности заполнены веществом, обладающим свойствами смазки и способностью нести нагрузку, сервоитной пленкой. Кроме того, это вещество

не уносится из зоны трения, а лишь поступает туда и удерживается там, т.е. обладает свойствами сохранности. Именно такой многофакторной защитой отличается от граничного трения явление ИП.

Действительно, сервоитная пленка исключает взаимодействие шероховатостей поверхностей, а электрический заряд частиц износа возвращает частицы в зону контактного взаимодействия поверхностей. Нужны также меры против окисления металлов, так как окисные пленки, разрушаясь при трении, составляют часть расхода металлов на износ. В режиме трения при ИП это достигается восстановительным характером химических процессов при трении. Возникает необходимость преодолеть трудность, связанную с термической нестабильностью смазок и металлов. При ИП преодоление осуществляется путем усиленной интенсификации окислительных процессов продуктов трибодеструкции смазки и восстановлением окисных пленок меди до металла. Тогда создается возможность хемосорбции окисленных продуктов, образующихся в результате трибодеструкции смазочного материала на восстановленном металле с образованием комплексных соединений.

Свободное комплексное соединение (соединение, находящееся в масле) работает как ПАВ, в хемосорбированном виде оно создает прочный термодинамический защитный слой и, наконец, способствует обмену веществом сервоитной пленки со средой, хемосорбируясь на атомах со свободными связями, образующимися у выхода дислокаций. Таким образом, оно выполняет тройную функцию.

Факторы безызносности, которые проявляются в процессе ИП и обеспечивают малые силы трения и безызносность узлов трения, в работах А.А. Полякова называются "системами снижения износа и трения" (СИТ). Такое название ближе подходит при рассмотрении ИП с термодинамических позиций. Поскольку в прежних изданиях книги "Триботехника" использовался термин "факторы безызносности", в этом издании он оставлен.

2.8.2. Контакт поверхностей трения через пластически деформируемый мягкий и тонкий слой металла

При обычном трении, как без смазочного материала, так и при граничной смазке, детали контактируют на очень малой площади, составляющей 0,01...0,0001 номинальной площади сопряженных поверхностей. В результате участки фактического контакта испытывают весьма высокие напряжения, что приводит к их взаимному внедрению, пластической деформации и, следовательно, к интенсивному изнашиванию. При граничном трении контакт сопряженных поверхностей происходит только в отдельных точках, то при ИП он осуществляется через пластически деформируемый мягкий и тонкий слой металла. В результате площадь фактического контакта возрастает в десятки раз, а материал деталей испытывает лишь упругие деформации.

Толщина сервовитной пленки достигает 1...2 мкм, что соответствует размерам неровностей (или перекрывает их) большинства деталей общего машиностроения. При граничной смазке взаимодействие неровностей поверхностей вызывает усталостное изнашивание. При ИП трение непрерывное (континуальное), площадки контакта плоские. Имеющиеся методы определения площади контакта, формулы сближения поверхностей, кривые опорной поверхности, а также методы и приборы для исследования свойств контакта не годятся для условий ИП.

Помимо увеличения площади фактического контакта, тонкие пленки мягкого металла сами по себе уменьшают трение между твердыми соприкасающимися поверхностями. Ф. Боуден и Д. Тейбор. изучали трение стального ползуна о пленку индия, нанесенную на инструментальную сталь разной толщины и показали, что имеется оптимальная толщина пленки, обеспечивающая минимум коэффициента трения. Нагрузка воспринимается через пленку, которая не выдавливается и предохраняет поверхности трущихся тел от непосредственного контакта. Срез происходит в мягком металле (в случае схватывания пленки и материала ползуна).

При уменьшении толщины пленки сила трения убывает, но при толщине около 0,1 мкм наступает предел, с переходом за который трение начинает возрастать, а при толщине 0,01 мкм, как указывают авторы, пленка перестает быть эффективной. Вероятно, вследствие того что при очень тонких пленках из-за недостаточной их равномерности отложения не исключается наличие участков без индия.

Металлические пленки могут выдерживать весьма высокие нагрузки без разрушения, тем не менее, исследования показывают, что после многократного прохождения ползуна по пленке индия она начинает разрушаться. Опыты проводились для пленок индия, нанесенных на серебро, и пленок свинца, нанесенных на сталь и медь. Во всех случаях величина нагрузки, при которой происходило разрушение пленки, зависит от толщины пленки, ее адгезионной прочности по отношению к нижележащей основе и от твердости последней. Эти опыты подтверждают свойство мягкой металлической пленки снижать трение и износ.

Помимо действия самой тонкой и мягкой пленки, выдвигается требование твердой подложки. В сумме эффект пленки и подложки локализует деформирование в пластичном материале. Практика триботехники подтверждает целесообразность такого разделения функций поверхностного слоя. Нанесение тонкого слоя индия гальваническим способом на тяжело нагруженные бронзовые подшипники скольжения авиационных поршневых двигателей широко применялось в ремонтных предприятиях в 1950-е гг.

Пленка, образуемая в процессе трения при ИП, содержит большое количество вакансий, что делает ее полужидкой. Такая структура пленки снижает трение и исключает ее наклеп. Материал пленки с повышенной концентрацией вакансий достигает особого критического состояния, когда скопление дефектов становится неустойчивым и повышение температуры или концентрация вакансий вызывает процесс типа кристаллизации.

Источниками вакансий в пленке, как пишет А.А. Поляков, могут быть:

- эффект растворения сплава в процессе трения в активной среде;
- деформирование пленки в повторном цикле растяжение–сжатие;
- эффект растворения пустот на поверхности и в порах в восстановительных условиях;
- повышенная концентрация вакансий тонкопленочного объекта. Особенности тонких пленок, отличающихся от их массивного состояния, посвящена обширная литература.

2.8.3. Предотвращение процесса окисления металла на поверхностях трения

При трении с граничной смазкой и трении без смазочного материала поверхности деталей всегда покрыты окисными пленками (рис. 2.19), которые, как известно, предотвращают непосредственный контакт металлических поверхностей и их схватывание при разрушении масляных пленок. Масляные пленки чаще всего разрушаются при температурных вспышках в зоне непосредственного контакта шероховатостей.

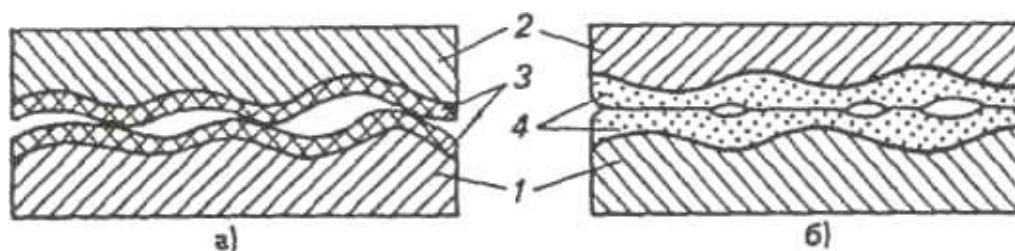


Рис. 2.19. Образования на поверхности контакта деталей при граничной смазке (а) и ИП (б):

1 – сталь; 2 – бронза; 3 – окисные пленки; 4 – серовитные пленки

Однако окисные пленки хрупки, не способны многократно деформироваться, поэтому в процессе трения разрушаются в первую очередь, в результате чего их защитное действие ослабевает. С повышением температуры в зоне трения окисные пленки утолщаются, но при этом увеличивается объем их разрушения.

В режиме ИП трение происходит без окисления поверхностей и поэтому не сопровождается образованием окисных пленок. Защиту поверхностей от окисления выполняют плотные слои положительно заряженных адсорбированных поверхностно-активных веществ, которые образуются в процессе трения и предотвращают поступление кислорода к сервовитной пленке. Отсутствие окисных пленок уменьшает работу выхода электрона и способствует протеканию хемосорбционных процессов, в результате создается дополнительная защита от изнашивания.

При обычном трении окисные пленки препятствуют выходу дислокаций на поверхность, это усиливает наклеп поверхностного слоя и его разрушение. Сервовитная пленка не наклёпывается и может многократно деформироваться без разрушения, так как при отсутствии окисных пленок дислокации в ней легко выходят на поверхность и разряжаются. Поскольку пленка еще и пориста, то дислокации могут разряжаться в поры самой пленки.

Экспериментально доказано А.А. Поляковым отсутствие окисления поверхностей трущихся деталей при ИП. Он показал, что при трибодеструкции и окислении углеводородов смазочного материала может образовываться ряд восстановителей вплоть до водорода. Так медный диск, подвергнутый высокому отжигу (1020 °С), в результате которого он покрывался темным оксидом меди стекловидной структуры толщиной 0,15мм, был установлен в машину трения АЕ-5, где по его поверхности терлись три стальных образца при смазке глицерином. В процессе трения на окисленных поверхностях трения диска и стальных образцов образовывался тонкий слой меди. Пленка оксида меди не была изношена до основного металла. Химическим путем в продуктах деструкции глицерина были обнаружены акролеин, муравьиный альдегид и некоторые другие соединения, которые легко восстанавливают оксид меди.

2.8.4. Реализация эффекта Ребиндера

Почти все смазочные материалы содержат поверхностно-активные вещества (ПАВ), что предопределяет возможность пластификации поверхностных слоев материалов трущихся деталей и снижения сил трения в результате действия эффекта Ребиндера. При обычном трении окисные пленки препятствуют проникновению среды (а вместе с ней и ПАВ) к металлу, чем снижается эффект Ребиндера; в результате пластические деформации участков контакта охватывают более глубокие слои (рис. 2.20, а).

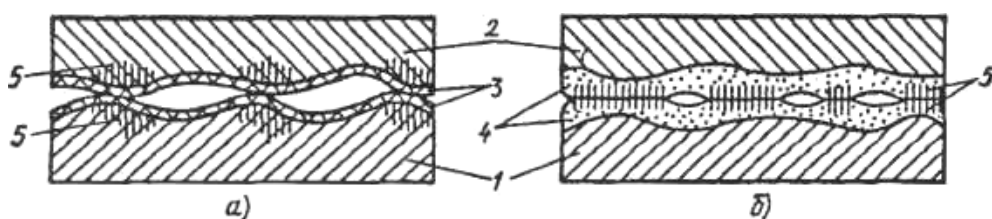


Рис. 2.20. Схема распространения деформаций в местах контакта при граничной смазке (а) и ИП (б):

1 – сталь; 2 – бронза; 3 – окисные пленки; 4 – сервовитные пленки; 5 – места пластической деформации

При ИП окисные пленки отсутствуют и действие эффекта Ребиндера реализуется в полной мере, в результате деформируется лишь сервовитная пленка; подповерхностные слои металла деформации не претерпевают (рис. 2.20, б). Поскольку молекулы ПАВ находятся в порах сервовитной пленки, не исключается скольжение и внутри пленки по принципу диффузионно-вакансионного механизма, но с малыми затратами энергии. Все это снижает трение и изнашивание.

2.8.5. Перенос частиц с одной поверхности трения на другую и удержание их в зоне контакта

Продуктами износа при трении в условиях граничной смазки являются в основном окислы, которые не имеют электрического заряда, свободно уносятся из зоны трения и, перемещаясь между контактирующими поверхностями, оказывают на них абразивное действие (рис. 2.21, а).

Поэтому конструкторы и специалисты по эксплуатации машин стараются принять все меры по удалению продуктов износа из зоны контакта и всей смазочной системы.

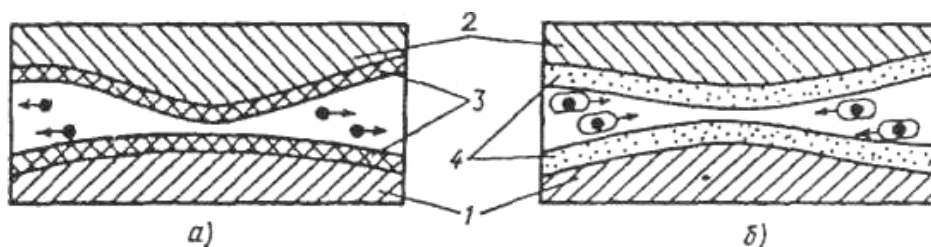


Рис. 2.21. Схема движения частиц износа в зоне контакта при граничной смазке (а) и ИП (б).

1 – сталь; 2 – бронза; 3 – окисные пленки; 4 – сервовитные пленки

При наличии на поверхностях трения сервовитной пленки продукты износа состоят из меди и других металлов; их поверхность пориста и весьма активна, поэтому частицы покрываются адсорбционным слоем ПАВ. Такие частицы (мицеллы) имеют электрический заряд и под действием его сосредотачиваются в зазоре (рис. 2.21, б). Кроме того, при ИП частицы могут переноситься с одной поверхности трения на другую (схватываться), не вызывая повреждения этих поверхностей.

При ИП процессы схватывания материала сервовитной пленки с основой не являются вредными, как при обычном трении. В начальной стадии ИП образующиеся ПАВ интенсифицируют процесс поверхностного диспергирования. Адсорбируясь на диспергированных частицах, ПАВ образуют устойчивую дисперсную систему (создание мицелл). Этому

способствуют процессы полимеризации, поликонденсации и трибодеструкции. Благодаря разности потенциалов между зоной контакта и остальной поверхностью мицеллы будут иметь направленное движение в зону контакта (электрофорез), где разряжаясь, будут создавать медный слой – сервовитную пленку.

Так как мицеллы – это электрически заряженные частицы, имеющие слои адсорбированных молекул ПАВ, то остаточный после разрядки их заряд способен вызвать между сопряженными пленками кулоновские силы отталкивания. Снижению адгезии будет способствовать также то, что молекулы ПАВ расположены в мицелле радиально, и при нагружении их взаимодействие с подложкой будет значительно слабее, чем если бы они располагались по плоскости.

Электрофорез компенсирует потерю диспергированных частиц пленки, возвращая их в зону контакта. Это относится к частицам коллоидного размера, которые в установившемся режиме составляют основную массу частиц. Важным случаем является перенос ионов и более крупных заряженных частиц к месту фрикционного контакта в электрохимическом процессе между зоной контакта и остальными поверхностями (иногда даже не участвующими в трении). Это относится ко всем электропроводным смазочным материалам — растворам кислот, солей, а также к углеводородам, содержащим электропроводные добавки. Сюда же относится и осаждение частиц меди в зоне фрикционного контакта, переносимых в смазочной системе холодильников потоком фреона из мест слабого коррозионного растворения материала медных трубок в системе охлаждения.

Приведем еще один пример переноса меди и ее осаждения на поверхности трения уплотнительных колец, используемых в химическом оборудовании. Поверхности трения уплотнительных колец, изготовленных из коррозионно- стойких сталей 14X17H2, 12X18H10T и др., при смазывании раствором серной кислоты в процессе работы покрывались пленкой меди. Пленка меди формировалась из ионов меди, находящихся в растворе серной кислоты. Ионы же меди в серную кислоту "поставляли" детали, находящиеся в контакте с серной кислотой, не участвующие в трении, но содержащие небольшое количество меди (могут быть даже примеси).

Работа выполнена Б.Д. Воронковым. На рис. 2.22 показано одно из колец торцевого уплотнения, изготовленного из твердого сплава ВК-6, рабочая поверхность которого покрыта тонкой пленкой меди, образовавшейся при трении кольца в 5 %-ном растворе серной кислоты.

В данном случае в начале работы торцевого уплотнения ни в кольцах, ни в смазочной среде меди не было. Ионы меди в растворе серной кислоты появились после растворения в кислоте стальной детали, крепившей одно из

уплотнительных колец. В этой детали медь находилась как примесь, без специального легирования.

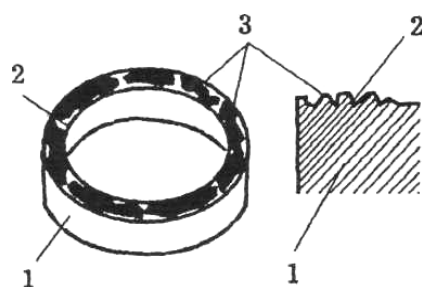


Рис. 2.22. Кольцо торцевого уплотнения из твердого сплава ВКВ:

1 – кольцо; 2 – поверхность трения; 3 – пятна меди (по Б.Д. Воронкову)

2.8.6. Образование продуктов полимеризации смазочного материала на поверхности сервовитной пленки

Для повышения несущей способности смазочной пленки при трении в смазочный материал вводят специальные добавки (например, смесь метилового спирта многоосновной кислоты и полиамидов), которые при трении полимеризуются и создают на поверхностях трения дополнительный защитный слой, предотвращающий их от непосредственного контакта. Однако в условиях граничного трения такая пленка образуется с трудом, так как оксидная пленка (будучи инактивной) препятствует реакции поликонденсации и полимеризации (рис. 2.23, а).

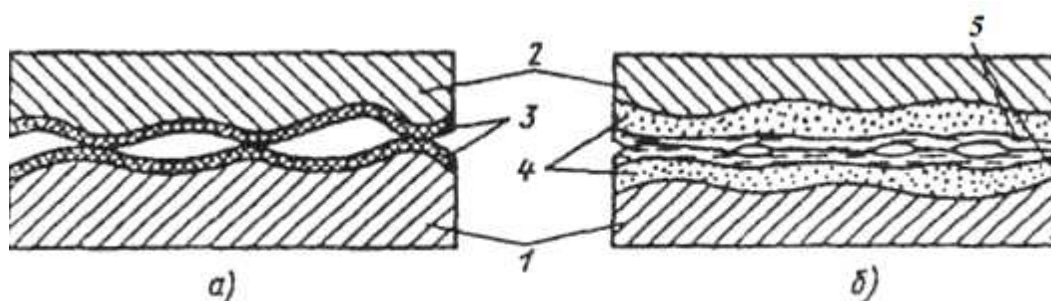


Рис. 2.23. Схема контакта деталей при наличии смазочного материала со специальными присадками при граничной смазке (а) и ИП (б):

1 – сталь; 2 – бронза; 3 – окисные пленки; 4 – сервовитные пленки; 5 – полимерные пленки

При ИП окисные пленки отсутствуют, и сервовитная пленка является мощным катализатором полимеризации. Полимерная пленка образуется из свободных радикалов органических веществ, которые возникают в процессе трибодеструкции смазочного материала (рис. 2.23, б). Образовавшаяся полимерная пленка предотвращает непосредственный контакт металлических поверхностей и снижает пиковые давления.

Ранее было отмечено, что при трении пары бронза–сталь в среде глицерина в результате химических превращений последнего может происходить образование высокомолекулярных соединений, а также полимеров трения. Образующийся каркас из полимерных молекул дополняет ранее рассмотренные факторы, снижающие трение и износ деталей при ИП. Кроме того, в случае полимерного образования, имеющего полужидкую консистенцию, коэффициент трения близок к коэффициенту жидкостного трения. И, как известно, дублирование механических операций является одним из основных положений теории надежности. Здесь полимерная пленка дублирует сервовитную.

2.8.7. Защита поверхностей трения от водорода

Водородное изнашивание по масштабам проявления занимает одно из первых мест среди всех видов изнашивания. Водород образуется в процессе трения как продукт разложения водяных паров, топлива, смазочных материалов, смазочно-охлаждающих жидкостей, а также при деструкции в зоне контакта полимеров. Водород легко диффундирует вглубь металла, способствует образованию зародышей трещин в результате молизации в дефектах решетки и, в конечном счете, вызывает разрушение поверхностного слоя детали (рис. 2.24). Когда атомы водорода молизируются, в дефектах возникает своеобразная ловушка, так как молекулы, обладая большими размерами, чем атомы, не могут выйти из дефекта, и давление благодаря поступлению новых атомов в дефект возрастает до больших значений.

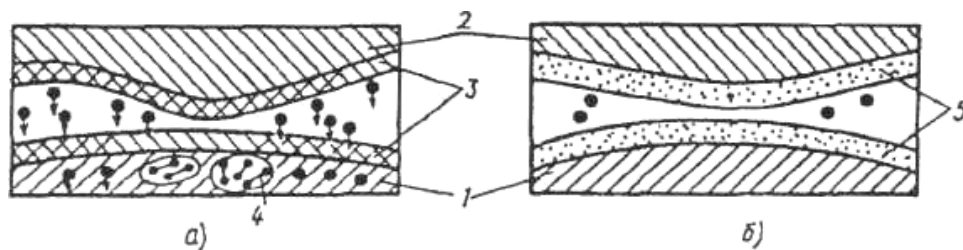


Рис. 2.24. Схема движения водорода в зоне контакта при граничной смазке (а) и ИП (б):

1 – сталь; 2 – бронза; 3 – окисные пленки; 4 – скопление ионов водорода и их молизация; 5 – сервовитные пленки

Возникшие напряжения, складываясь с напряжениями от трения, вызывают разрушение поверхностного слоя деталей. Водородное изнашивание, как правило, сопровождается абразивное, коррозионно-механическое изнашивания, фреттинг-коррозию и др.

Поскольку изучение водородного изнашивания только началось, методы защиты от него для многих деталей еще не разработаны, и пока наиболее эффективной защитой является ИП.

Образующаяся при ИП медная пленка снижает нагрузку до уровней, при которых образования водорода практически не происходит. Кроме того, медная пленка является хорошей защитой от проникновения водорода в сталь (рис. 2.24, б).

2.8.8. Возбуждение кристаллической решетки

Отличительной особенностью ИП от граничного трения является значительное возбуждение поверхностного слоя кристаллической решетки металла. Трение возбуждает поверхностные слои, вызывая их химическую активизацию и возбуждение экзоэлектронной эмиссии. Оно возбуждает и подповерхностные слои и вызывает движение дислокаций при деформировании. Все это относится к слабо неравновесным системам.

Для осуществления ИП необходимо состояние кристаллической решетки, далекое от равновесия. Имеется в виду использование нового фактора – квантовой структуры энергетического состояния термов.

Когда сплав избирательно растворяется в процессе деформирования, возникает высоко неравновесная концентрация вакансий, ускоряющая диффузию на порядки, возбуждая атомы решетки. В этих условиях становится возможным кинетический фазовый переход от консервативного движения дислокаций к переползанию, что является решающим при бездефектном деформировании поверхностного слоя (сервоитной пленки).

В результате химической реакции между радикалами и атомами в пленке образуются ПАВ. Высокая подвижность материала пленки обеспечивает завершение реакции и образование вакансий на месте вступившего в реакцию атома. При этом реализуется необходимый для снижения трения разрыв непрерывности свойств между пленкой и основным металлом, который пластически не деформируется, а лишь упруго поддерживает подвижную пленку; вся деформация сосредоточивается в пленке.

При деформировании сервоитной пленки образуются дислокации. Пленка тонкая и при ее деформировании дислокации выходят на поверхность; они разряжаются и активизируют поверхность. В связи с этим явлением возникла дислокационная теория активации схватывания металлов. При ИП этого не происходит, так как возникают благоприятные условия для образования координационных соединений. Прежде чем наступит схватывание, возникает химическая реакция (более термодинамически вероятная и предупреждающая схватывание) между активной поверхностью пленки и молекулами смазочного материала.

Активация поверхности особенно резко увеличивается, как показал О.Н. Курлов, при возвратно-поступательном и возвратно-вращательном движениях, т.е. тогда, когда поверхность трения испытывает растягивающие напряжения. В этих условиях резко снижаются коэффициент трения и износ.

На основании расчета построена энергетическая модель состояния атомов (рис. 2.25), по которой можно оценить площадь активного центра, образованного при выходе дислокации на поверхность, и число атомов в нем. Такая оценка показывает возможность высокой активности этих участков поверхности в отношении хемосорбции.

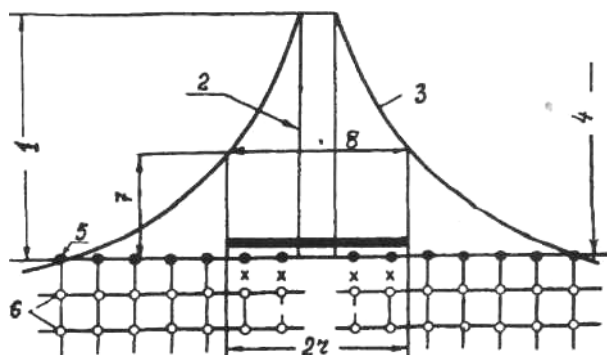


Рис. 2.25. Модель активного центра, образованного при выходе дислокации на поверхность:

1 – энергия поля искажений; 2 – ядро дислокаций; 3 – поле искажений; 4 – средний энергетический уровень атомов; 5 – кислород; 6 – металл; 7 – потенциальный барьер; 8 – активный центр; r – радиус действия энергии дислокаций; x – разорванные связи атомов

Химически активные компоненты смазки – лиганды образуют на площадках выхода дислокаций (местах контакта) медные комплексы, в частности, объемной или плоской структуры (рис. 2.26). Образование в комплексе координационной связи приводит к ослаблению и разрыву связи атома металла в комплексе с атомами металла в решетке.

Связь между металлом и комплексом переходит в адсорбционную. Комплекс получает возможность двигаться по поверхности, соединяясь с другими комплексами в островки пленки.

Схематически островок изображен на рис. 2.26. Образование таких островков подтверждено рентгеноструктурным анализом. Пленки подобного строения имеют ряд особенностей, присущих только условиям трения в режиме ИП. Такие пленки А.А. Поляков назвал «серфинг-пленками» (от английского слова, означающего скольжение по волне). Серфинг-пленки осуществляют «коллективное» адсорбционное действие, пластифицируя металл, что в обычных условиях трения затрудняется (ингибируется) пленками окислов.

Трение при ИП создает повышенную на два порядка концентрацию вакансий и, следовательно, резко увеличивает концентрацию локализованных носителей заряда на них, что создает широкий диапазон видов хемосорбции.

Разложение комплексов в пленке в результате повышения температуры дает выделение меди и осаждение ее на поверхность. По данным А.С.

Кужарова, скорость образования комплексов в установившемся режиме трения равна скорости его распада. Осажденные и разрядившиеся ионы металла образуют снова материал пленки.

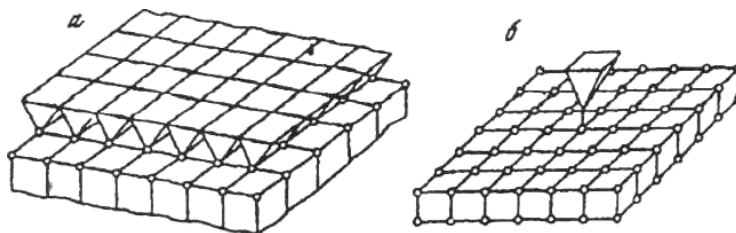


Рис. 2.26. Образование серфинг-пленки из молекул комплексного соединения:

а — комплексы по всей поверхности; б — одиночный комплекс

Этому помогает явление электрофореза, благодаря которому ионы втягиваются в зазор между трущимися деталями, а не теряются со смазкой. Возникает своеобразный ионный обмен, сохраняющий материал пленки.

2.9. Влияние металлоплакирующих присадок на окисление и вязкость масел

Срок службы смазочного масла зависит от его способности противостоять окислению (старению), т.е. изменению физико-химических показателей и эксплуатационных свойств с течением времени в процессе применения и хранения.

Противоокислительная стабильность масла является одним из важнейших свойств, определяющих его долговечность. Чем меньше стабильность, тем чаще его нужно менять в эксплуатации. Старение масла происходит в результате его окисления кислородом воздуха.

Поэтому срок службы любого смазочного масла, если оно не загрязняется продуктами износа и абразивом, определяется его противоокислительной устойчивостью. Под воздействием температуры и кислорода в масле образуются первичные и вторичные продукты окисления:

1. Карбоновые и оксикарбоновые кислоты, повышающие кислотное число масла, что приводит к коррозионной агрессивности масла.
2. В результате полимеризации и поликонденсации вторичных продуктов окисления возрастает содержание в масле смол, асфальтенов, карбенов и карбоидов, способствующих осадкообразованию.
3. С накоплением смолообразных продуктов в масле увеличивается его вязкость по сравнению с исходной.

В литературе отмечается, что скорость окисления масел может значительно повыситься в присутствии металлических катализаторов — меди,

свинца, олова, железа, марганца, хрома, ванадия. В целях уменьшения окисления масла даются рекомендации по исключению применения в маслопроводах медных трубок, латунных фитингов, антифрикционных сплавов, свинца в составе вкладышей подшипников.

В качестве примера влияния металлов на окисление масла приведем результаты экспериментов, представленные в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Каталитическое действие металлов на окисление масел кислородом при 120 °С (продолжительность опытов 70 ч)

| Показатель | Исходное масло | После окисления в присутствии | | | | | |
|---------------------------|----------------|-------------------------------|--------|------|-------|--------|------|
| | | без металла | свинец | медь | олово | железо | цинк |
| Кислотное число, мг КОН/г | 0,06 | 0,06 | 11,8 | 0,17 | 0,07 | 0,06 | 0,06 |
| Содержание смол, % | 0 | 0 | 29,3 | 2,5 | 1,3 | 0,6 | 0,8 |

Предполагается, что при эксплуатации машин окисление смазочного масла ускоряется вследствие контакта его со смазываемыми поверхностями из таких металлов, а также от каталитического воздействия попадающих в масло продуктов коррозии и износа поверхностей трения.

При разработке металлоплакирующих присадок к маслам, реализующим ИП при трении, у специалистов по смазочным материалам возникло возражение, а именно: образующаяся сервовитная пленка из меди на стальных поверхностях будет усиленно окислять масло, что снизит его срок службы. Это особенно интенсивно будет происходить с маслами, применяемыми в теплонапряженных двигателях внутреннего сгорания. Кроме того, с введением медьсодержащей присадки в масло повысится скорость окисления и увеличится его вязкость, что неблагоприятно скажется на пусковых качествах двигателя внутреннего сгорания или другой машины. Другими словами, медьсодержащая присадка к маслу принесет только вред – ухудшит эксплуатационные свойства масла.

Медьсодержащую присадку нельзя допустить к двигателям внутреннего сгорания на "пушечный выстрел. Однако, как будет показано далее, такое категоричное заявление оказалось ошибочным.

2.10. Эффект безызносности (избирательный перенос) как диссипативная структура

В предисловии к сборнику "Синергетика" академик Б.В. Кадомцев пишет: «Этот термин получил достаточно широкое признание и распространение как некоторое общее название для междисциплинарной области, занимающейся изучением появления и развития, упорядоченных во

времени или в пространстве (или то и другое вместе), процессов или структур. Не только в физике, но и в других науках, изучающих более сложные явления природы, очень часто приходится встречаться с самоорганизацией появлением и развитием структур в первоначально однородной среде» [15].

Предварительно рассмотрим одно интересное самоорганизующееся явление – образование ячеек Бенара, известное многим специалистам и являющееся классическим примером в области синергетики.

Сущность явления состоит в следующем. Если на сковороду налить жидкость (масло) и начинать ее подогреть, то с некоторого момента на поверхности масла будут образовываться геометрические фигуры в виде ячеексот (рис. 2.27).

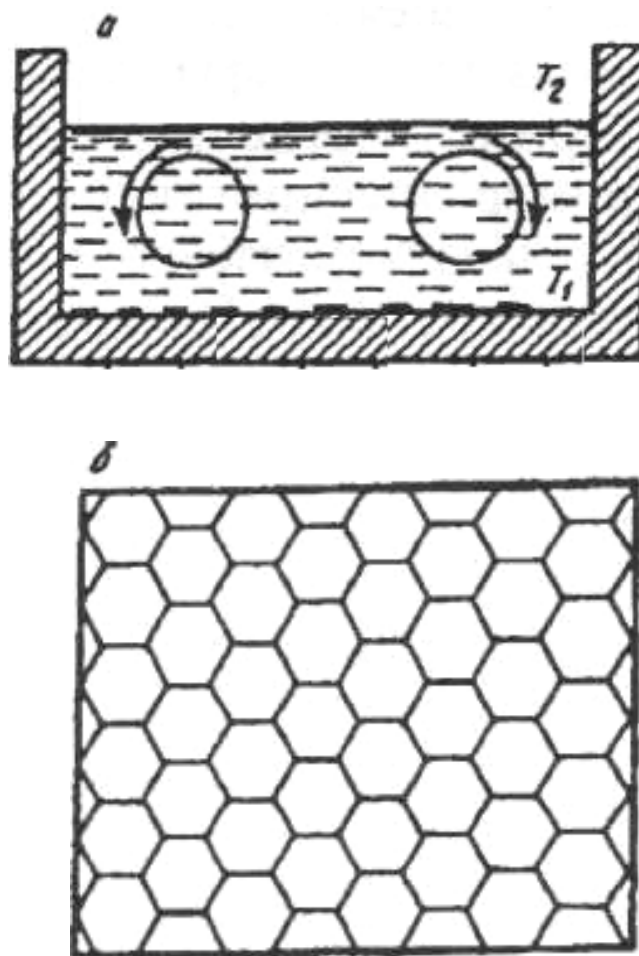


Рис. 2.27. Образование ячеек Бенара при нагреве жидкости

Можно сказать, что с некоторого момента нагрева жидкость получает неустойчивость, что приводит к изменению ее структуры. Неустойчивость жидкости связана с возникновением вертикального градиента температур порогового (бифуркационного) уровня.

До этого уровня сохраняется стационарное состояние, при котором перенос тепла снизу вверх происходит в результате только теплопроводности.

Здесь конвекция отсутствует. При достижении определенной точки (точки бифуркации) происходит самоорганизация диссипативной структуры в виде ячеек Бенара в результате появления нового механизма переноса тепла – конвективных потоков. При этом жидкость спонтанно разделяется на гексагональные ячейки, напоминающие соты, в результате кооперативного движения ее молекул при достижении критического градиента температур.

На рис. 2.28 показана схема образования конвекции и бенаровских ячеек. Процесс конвекции связан с тем, что вследствие теплового расширения жидкость расслаивается – в нижних слоях плотность нагретой жидкости ниже, чем в верхних.

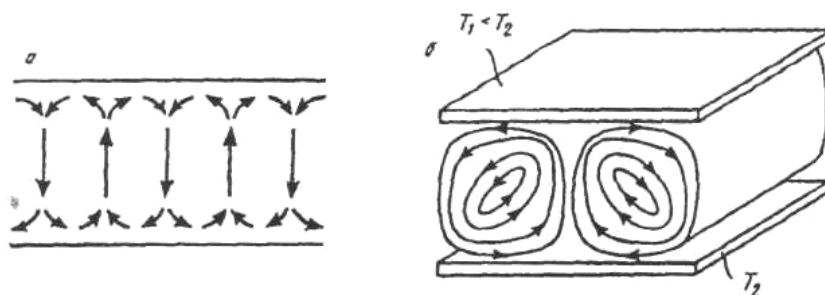


Рис. 2.28. Два изображения конвективных (бенаровских) ячеек

В результате верхние слои под действием силы тяжести передвигаются вниз, а нижние, более легкие, стремятся переместиться вверх. Можно отметить, что после порогового повышения температуры возникает новая структура жидкости, с более высоким отводом теплоты от поверхности, что позволяет избежать ее перегрева.

Жидкость, в данном случае, после перехода точки бифуркации получила диссипативную структуру. Поток энергии упорядочил систему и увеличил диссипацию тепла. Этот пример диссипативной структуры приведен с тем, чтобы сравнить его с явлением ИП. Такое исследование было выполнено А.А. Поляковым.

2.11. Исследование диссипативных структур

Результаты исследования диссипативных структур Бенара и ИП, выполненные А.А. Поляковым, приведены в табл. 2.2.

Несмотря на общность схемы, диссипативные структуры в разных условиях и с разными материалами могут значительно различаться. Однако как в том, так и в другом случае наблюдается диссипативная структура, которая возникает не после любого фазового перехода, а только после кинетического. При ИП кинетический фазовый переход состоит в изменении движения дислокаций от консервативного движения к переползанию, что наблюдается в известном явлении диффузионно-вакансионного механизма.

| Сравнительные данные эффекта Бенара и эффекта ИП | | |
|--|--|--|
| Содержание сравнения | Эффект Бенара | Эффект ИП |
| 1. В чем состоит эффект перехода к диссипативной структуре | Отдача теплоты во внешнюю среду идет стационарно, без возрастания энтропии, что позволяет избежать перегрева | Деформирование при трении происходит без возрастания конфигурационной энтропии, что позволяет избежать разрушения (эффект безызносности) |
| 2. Элемент, образующий диссипативную структуру | Молекула жидкости | Атом металла |
| 3. Определяющий вид энтропии | Тепловая | Конфигурационная (дислокации) |
| 4. Вид негэнтропии | Охлаждение | Разрядка дислокаций при реакции с вакансией или при выходе на поверхность |
| 5. В чем состоит кинетический переход к новому состоянию | В образовании конвективной ячеистой структуры | В переходе от консервативного движения дислокаций к их переползанию |
| 6. Элемент обмена с внешней средой | Теплота | Атом в барьере, мешающем выходу дислокаций на поверхность |
| 7. Способ приспособляемости структуры до критического перехода к сти диссипативной структуре | Ускорение ламинарных потоков жидкости | Образование ячеистой дислокационной структуры |

Неустойчивость при этом сохраняется бесконечно долго; материал не деградирует, он непрерывно деформируется, минуя стадию деструкции.

Исследованиями А.А. Полякова установлено:

1. Трение – диссипативный необратимый процесс в поверхностном слое металла. В процессе трения, согласно представлениям неравновесной термодинамики, могут возникать диссипативные структуры. Близость системы к равновесию и недостаточность ее возбуждения затрудняют процесс самоорганизации в поверхностном слое металла при трении и образование диссипативной структуры. Механизмами, которые усиливают возбуждение и могут удалить систему от равновесия, создать преобладание диффузионных потоков при деформировании, могут быть избирательное растворение, либо конденсация металла при его осаждении при трении, способствующие образованию неравновесных вакансий.
2. В диссипативном процессе трения кроме обычной энтропии в металле возникает конфигурационная энтропия, выражающаяся в образовании дефектов кристаллической решетки и приводящая к его разрушению. Эта энтропия является объектом исследования и управления.
3. В результате возбуждения металла потоками энергии при трении и деформирования возникают противоборствующие процессы упрочнения и

разупрочнения, процессы облегчения и затруднения деформации (подсистемы снижения энтропии или снижения износа и трения). Некоторые подобные процессы могут быть вызваны извне, например нагревом, закалкой, что позволяет оптимизировать систему в отношении износа или деформирования. В обоих случаях эти процессы происходят вблизи равновесия, когда преобладает консервативное движение дислокаций и обозначается как нулевая синергетика. Используя специальные методы возбуждения металла при деформировании (избирательное растворение, конденсация) для удаления от равновесия и достижения точки кинетического фазового перехода от консервативного движения дислокаций к преимущественному переползанию, можно вызвать образование диссипативной структуры. При этом переходе возникают другие факторы снижения энтропии – синергетика первого порядка.

4. Исследование явления ИП при трении показало, что оно является следствием удаления системы от равновесия путем возбуждения элементов системы, которые приведены в когерентное состояние при самоорганизации подсистем синергетики первого порядка, способствующих возникновению периодического безбарьерного диффузионно- вакансионного механизма переползания дислокаций, сопровождаемого снижением трения и эффектом безызносности.
5. Режим структурной приспособляемости, изученный Б.И. Костецким и Л.И. Бершадским (полагая, что это является самоорганизацией), улучшающий антифрикционные характеристики узла трения, находится ближе к равновесию, чем режим ИП, поскольку последний возникает после перехода от консервативного движения дислокаций к переползанию, обеспечивающему обратимую пластическую деформацию. Режим структурной приспособляемости при граничном трении располагает способами снижения скорости возрастания энтропии – системами оптимизации износа и трения, однако это не относится к синергетике.
6. Режим ИП использует особые методы возбуждения элементов системы и перехода их в когерентное состояние. Избирательное растворение при трении, ослабляя атомную решетку, как бы создавая подрешетку вакансий, приводит к тому, что преимущественным видом движения дислокаций оказывается переползание. Избирательное растворение приводит к катодной поляризации и пассивации поверхности, создавая пленку металла без оксидов, насыщенную вакансиями, в которой локализуется трение (так называемую сервовитную пленку). Избирательное растворение порождает синергетику первого порядка, способствуя образованию систем, ограничивающих рост конфигурационной энтропии, "бездефектное" обратимое пластическое деформирование пленки. В результате избирательного растворения образуются комплексные соединения, представляющие собой, как правило, объемную или плоскую молекулу. Они образуют в результате частичной их ассоциации хемосорбированные

пленки с повышенными антифрикционными свойствами как в отношении прочности связи (обеспечивающей долговечность службы смазочного материала), так и в отношении уменьшения трения. В соответствии с указанными особыми свойствами пленки получили название серфинг-пленок.

7. В парах трения, не содержащих бронз, например сталь–сталь, в результате распада комплексного соединения, высвобождения иона металла и последующей его разрядки может возникать металлическая пленка, получившая название металлоплакирующей. Пленка образуется из-за конденсации атомов в восстановительных условиях. Это свойство обуславливает создание универсальной смазочной композиции – металлоплакирующей смазки.
8. На начальной стадии трения на поверхности в соответствии с иерархией адсорбционных сил образуется многослойная защита, состоящая из серовитной пленки, серфинг-пленки, коллоидного слоя и полимерных образований. Подобная система, образуемая в восстановительных условиях, поглощает адгезионные силы поверхности металла значительно, чем граничный слой смазочного материала при граничной смазке.
9. Свойство комплексного соединения поддерживать динамическое равновесие между концентрациями комплекса и его составляющими – лигандами и ионом металла – обуславливает регулирующее действие и обмен. Ионы металла, втягиваясь в зазор, разряжаются и коагулируют (конденсируются) с пленкой.
10. Диффузионно-вакансионный механизм, изученный в явлении микропластичности, присутствует и в явлении ИП. При насыщении вакансиями и встречном переползании дислокаций в пленке возникает неравновесный безбарьерный диффузионно-вакансионный механизм. Неравновесность его обуславливается тем, что пленка с помощью обратной связи подвергается избирательному растворению и упрочнению, попеременно усиливая и ослабляя потоки вакансий и дислокаций. Безбарьерность связана со способностью атомов, выходящих на поверхность, вступать в химическое соединение с лигандами смазочного материала и при трении десорбироваться. Это явление обмена атомами с внешней средой обозначено как скин-эффект.
11. Неравновесный безбарьерный диффузионно-вакансионный механизм может быть косвенно зафиксирован рентгеновским методом, как уменьшение параметра решетки a (отражая повышение концентрации вакансий) и как физическое уменьшение ширины рентгеновской линии P (уменьшение концентрации дислокаций), параметры λ и β отражают функционирование диффузионно-вакансионного механизма и поэтому могут служить критериями его существования и границ действия. Так, образование

интерметаллического соединения в ходе изменения концентрации легирующих элементов, препятствующее возникновению диффузионно-вакансионного механизма, может быть выявлено с помощью этих параметров.

12. Область действия механизма в координатах интенсивность изнашивания – нагрузка выглядит как область глубокого минимума. Совместное влияние некоторых комплексных соединений в смазочном материале может расширять ее по диапазону нагрузок и по относительной износостойкости, однако это требует эмпирического подбора. Как следует из работ А.А. Кутькова и Г.П. Барчана, максимальные температуры, достигнутые в режиме ИП, составляют 300..350 °С. Подбором лиганд, изменением их концентрации можно регулировать диапазон проявления вакансионно-дислокационного механизма.
13. Главной задачей продолжения исследований ИП является поиск комплексных соединений, позволяющих обеспечить практическую безызносность узлов трения в требуемых границах нагружений, температур и скоростей. Однако можно сделать заключение, что в зависимости от сочетания и соотношения факторов безызносности при трении может возникнуть:
 - а) состояние поверхностного слоя, отвечающее положению вблизи равновесия, когда несогласованы отдельные факторы, – это трение при граничной смазке, сопровождаемое более или менее медленным разрушением;
 - б) поверхностная пленка с полностью обратимой пластичностью, бесфинально функционирующая во времени, — это трение в режиме ИП;
 - в) наводороженное состояние поверхностного слоя, приводящее к его разрушению.

Исходя из изложенного, трение следует рассматривать как комплексы регулируемых факторов безызносности, наиболее упорядоченным из которых является диссипативная структура ИП.

Список литературы

1. Елин Л.В. Взаимное внедрение поверхностных слоев металлов, как одно из причин изнашивания при несовершенной смазке. Сб. «Трение и износ в машинах». М.: Изд-во АН СССР, 1959. №13.
2. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
3. Боуден Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка; пер. с англ. М.: Машгиз, 1960.
4. Кузнецов В.Д. Наросты при резании и трении. М.: Гостехиздат, 1956. 284 с.
5. Лозовский В.Н. Схватывание в прецизионных парах трения. М.: Наука, 1972. 83 с.
6. Голего Н.Л. Схватывание в машинах и методы его устранения. Киев: Изд-во «Техника», 1965. 230 с.
7. Гаркунов Д.Н., Суранов Г.И., Хрусталеv Ю.А. Триботехника. Водородное изнашивание деталей машин: учебное пособие. М.: Изд-во МСХА, 2007. 259 с.
8. Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев металлов. М.: Наука, 1983. 280 с.
9. Бабель В.Г. Композиции, улучшающие антиокислительные свойства и смазочную способность масел. Автореф. докт. дис. Ленинградский технологический институт, 1986. 47с.
10. Бабель В.Г., Байрамуков М.Д. Об использовании композиций, содержащих галогениды металлов переменной валентности и исследовании механизма их смазочного действия // Сб. долговечность трущихся деталей машин. Машиноведение. Вып. 2, 1987. С. 7–19.
11. Балабанов В. И, Мамыкин СМ., Хрусталеv Ю.А. и др. Специальная механическая обработка поверхностей катания колесной пары // Железные дороги мира. 1997. № 6/97. С. 3–5.
12. Балабанов В.И. Финишная антифрикционная безабразивная обработка деталей дизелей // Тракторы и сельхозмашины. 1996. № 2. С. 23–25.
13. Барчан Г.П., Чигаренко Г.Г., Пономаренко А.Г. Влияние строения сложных эфиров на процессы избирательного переноса // Химия и технология топлив и масел. № 7. 1979. С. 36–39.
14. Буше Н.А., Копытко В.В. Совместимость трущихся поверхностей. М.: Изд-во «Транспорт». 1981. 223 с.
15. Гаркунов Д.Н. Триботехника. М.: Машиностроение, 1985. 327 с.

16. Гаркунов Д.Н., Лозовский В.Н. Влияние фрикционного бронзирования и латунирования на качество поверхности // Сб. Качество поверхности деталей машин. № 5. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 386–389.
17. Гаркунов Д.Н., Польцер Г., Марчак Р. Две триботехники и одна цель. Эффект безызносности и триботехнологии. 1993. № 1. С. 21–39.
18. Гарновский А.Д., Бушкова Е.С. Влияние металлокомплексных и комплексобразующих добавок на свойства масел и смазок // Эффект безызносности и триботехнологии. 1992. № 2. С. 49–54.
19. Гегузии Я.Е. Очерки о диффузии в кристаллах. М.: Наука, 1974. 252 с.
20. Голуб М.В. Износостойкие композиционные материалы на основе карбида вольфрама, меди и никеля // Эффект безызносности и триботехнологии. 1994. № 1. С. 24–39.
21. Гречко В.О. Разработка медьсодержащих антифрикционных покрытий на основе волокон политетрафторэтилена // Автореф. дис. д-ра наук. Новочеркасск, 1982. 26 с.
22. Грискин Е.Н. Новый способ получения износостойкой, антифрикционной поверхности и ее экономическая эффективность // Материалы семинара. МДНТП., 1972. С. 183–188.
23. Денисов Е.Т., Мицкевич Н.И., Агабеков В.Е. Механизм жидкофазного окисления кислородсодержащих соединений. Минск: Наука и техника, 1972. 347 с.
24. Долговечность трущихся деталей машин. Вып. 5, 1990, 376 с.
25. Задошенко Е.Г. Трибологические и физико-химические особенности самоорганизации при трении в режиме безызносности. Автореф. канд. дис. Ростов-на-Дону, 1996. С. 26.
26. Защита от водородного износа в узлах трения. М.:Машиностроение,1980. 134 с.
27. Зиновьев В.М. и др. Способ создания антифрикционного медного слоя // Автор. св-во № 410211. Бюллетень "Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки". 1974. № 1.
28. Зуидема Г.Г. Эксплуатационные свойства смазочных масел. Гостоптехиздат, 1957. 170 с.
29. Иванова В.С. Синергетика. Прочность и разрушение металлических материалов. М.: Наука, 158 с.
30. Избирательный перенос при трении. М.: Изд-во Наука, 1975. 85 с.

31. Каракозов Э.С. Соединения металлов в твердой фазе. Металлургия. 1976. 262 с.
32. Костецкий Б.И. Трение, износ и смазка в машинах. Киев: Техника, 1979. 396 с.
33. Красиков С.Г. Исследование износостойкости узлов трения бытовых машин и повышение их долговечности с использованием избирательного переноса // Автореф. канд. дис. Московский технологический институт, 1972. 21 с.
34. Кужаров А.С., Онищук Н.Ю. Металлоплакирующие смазочные материалы // Долговечность трущихся деталей машин. Вып. 3. 1988. С. 96–143.
35. Курлов О.Н. Избирательный перенос в узлах трения машин" М.: Машиностроение, 1982. С. 111–126.
36. Кутьков А.А., Гречко В.О., Кужаров А.С. и др. Исследование механизма трения меднофторопластового композита // Трение и износ. 1980. Т. 1, №6. С. 993–999.
37. Кутьков А.А., Барчан Г.П. Исследование механизма трения при смазывании высокомолекулярными фторсодержащими полимерами в парах сталь – сплавы меди // Сб. Избирательный перенос в узлах трения. Моск. дом научно-техн. пропаганды, 1971. С. 23–29.
38. Лосиков Б.В., Пучков Н.Г., Энглин Б.А. Основы применения нефтепродуктов. Гостоптехиздат, 1959. 326 с.
39. Марчак Р., Кужаров А.С., Гузик Я., Задощенко Е.Г. Исследование трибологических проявлений самоорганизации в системе латунь–глицерин–сталь // Трение и износ, 1995, Т. 16, № 6. С. 878–886.
40. Марчак Р. Физико-химические аспекты избирательного переноса // Эффект безызносности и триботехнологии. № 1. 1993. С. 42–49.
41. Мур Д. Основы применения трибоники. М.: Мир, 1978. 488 с.
42. Мюке В. Исследования по триботехнике. М.: Изд. НИИ информации по машиностроению, 1975. С. 125.
43. Научно-технический прогресс. Словарь. М.: Изд-во политической литературы, 1987. 364 с.
44. Николис Г., Пригожий И. Познание сложного. М.: Мир, 1990. 512 с.
45. Оберемко А.В., Перченко А.А., Денисов Е.Т. и др. Роль спиртов в торможении реакций окисления парафинов стеарином марганца. М.: Нефтехимия, 1971. Т. 2. С. 229–233.
46. Орлов П.И. Смазка легких двигателей. ОНТИ, 1937. 462 с.

47. Осипов А.И. Самоорганизация и хаос. М.: Знание (физика), 1986. 64 с.
48. Польцер Г., Фирковский А., Ланге И.И. и др. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) и избирательный перенос // Долговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение. 1990. Вып. 4. С. 86–122.
49. Поляков А.А. Трение на основе самоорганизации // Эффект безызносности и триботехнологии. 1996. № 3–4. С. 47–119.
50. Поляков А.А. Опыт исследования диссипативной структуры избирательного переноса в металлической пленке при трении (обзор) // Эффект безызносности и триботехнологии. 1996. № 3–4. С. 30–44.
51. Поляков А.А., Гаркунов Д.Н., Симаков Ю.С. и др. Защита от водородного износа в узлах трения. М.: Машиностроение, 1980. 133 с.
52. Поляков А.А. К вопросу о синергетике, деформации, износе и энтропии металлических материалов // Эффект безызносности и триботехнологии. 1987, №2. С. 11–18.
53. Поляков А.А. Роль серфинг-пленки в избирательном переносе // Трение и износ. 1991. Т. 12. № 1. С. 109–112.
54. Поляков А.А., Рузанов Ф.И. Трение на основе самоорганизации. М.: Наука, 1992. 135 с.
55. Поляков А.А., Гаркунов Д.Н. О механизме избирательного растворения и переноса при трении меди и медных сплавов со сталью в глицерине // Сб. статей "Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа". Издание АН СССР. М.: 1971. С. 63–71.
56. Поляков А.А., Курлов О.Н. Влияние напряженного состояния поверхности трения на возбуждение и режим установившегося трения при избирательном переносе // Сб. Исследование смазочных материалов при трении. Изд-во Наука, 1981. С. 214.
57. Проблемы безызносного трения в машинах. Изд. WYDAWNICTWO.RADOM. 12–13 mai 1993.
58. Прокопенко А.К. Избирательный перенос в узлах трения машин бытового назначения. М.: Легпромбытиздат. 1987. 104 с.
59. Прокопенко А.К., Красиков С.Г., Симаков Ю.С. Проявление избирательного переноса в узлах трения компрессоров // Сб. статей "Применение избирательного переноса в узлах трения машин". М.: Изд-во.Стандарты, 1976. Т. 2. С. 68–70.

60. Розенберг Ю.А., Виноградова И.Э. Смазка механизмов машин. Гостоптехиздет, 1960.170 с.
61. Рубин М.Б. Контактные процессы в режиме избирательного переноса при смазке водой // Сб. Повышение износостойкости на основе избирательного переноса. М.: Машиностроение, 1977. С. 43–49.
62. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура поверхностных слоев металла при трении//Поверхность. Физика, химия, механика. 1983. № 8.С. 144–153.
63. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Металловедение в науке о трении и изнашивании // Металловедение и термическая обработка металлов. 1965. № 5. С. 12–23.
64. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. О рентгеноструктурном исследовании поверхностных слоев металла при трении в условиях избирательного переноса // Эффект безызносности и триботехнологии. 1992. № 2. С. 46–56.
65. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. М.: Машиностроение, 1982. 209 с.
66. Рыбакова Л.М. Рентгенографический метод скользящего пучка лучей и его возможности при исследовании избирательного переноса поверхностей твердых тел // Эффект безызносности и триботехнологии. 1997. № 1. С. 54–6.
67. Северденко В.П., Точинский Э.И. Структура тонких металлических пленок. Минск.: Наука и техника. 1968. 209 с.
68. Симаков Ю.С. Физико-химические процессы при избирательном переносе // В кн. "Избирательный перенос в тяжело нагруженных узлах трения". М.: Машиностроение, 1982. С. 88–111.
69. Синергетика. Сб. статей / пер. с англ. под ред. Б.В.Кадомцева. М.: Мир,1984. 247 с.
70. Трение и износ материалов на основе полимеров / Белый В.А., Свириденко А.И., Петраковец М.И. и др. Минск: Наука и техника, 1976. 430с.
71. Труды Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах. Т. 1. Издание АН СССР, 1939, 609 с. Т. 2. 1940. 412 с.
72. Гум Г. Надежность и износ на примере избирательного переноса // Вкн. Исследования по триботехнике. М.: Изд. НИИ информации по машиностроению, 1975. С. 265–272.
73. Физика тонких пленок / под общ. ред. Г. Хасса: в 4-х томах. М.: Мир,1967.

74. Фирковский А., Польцер Г. Структурирование трибологической системы в условиях избирательного переноса // Сб. Долговечности трущихся деталей машин. М.: Машиностроение. Вып. 4. 1990. С. 15–29.
75. Польцер Г., Фирковский А. ФАБО и избирательный перенос. Сб. Долговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение. Вып. 5. 1990. С. 145–153.
76. Хаккен Г. Синергетика. М.: Мир, 1985. 415 с.
77. Хрущев М.М. Исследование приработки подшипниковых сплавов и цапф. Изд-во АН СССР, 1946. 343 с.
78. Чигаренко Г.Г., Пономаренко А.Г., Барчан Г.П. Трибохимические процессы в органических средах // Вестник машиностроения. 1984. № 2. С. 47–49.
79. Чигаренко Г.Г., Пономаренко А.Г., Бурлов А.С., Гарновский А.Д. Исследование трибохимических реакций, приводящих к формированию смазочного слоя при избирательном переносе // Эффект безызносности и трибо-технологии. № 3–4. 1994. С. 64–75.
80. Шелепин Л.А. Вдали от равновесия // Новое в жизни, науке, технике. Физика. М.: Знание. 1987. С. 30–80.
81. Эбелинг В. Образование структур при неравновесных процессах. М.: Мир, 1973. 204 с.
82. Finkin M.F. What Happens When Parts Wear. "Machine Design", 1970, №3, p. 148–154.
83. Hornung E. Stand der Forschung auf dem Gebiet der Reaktionsschichtenbildung bei mechanischer Beanspruchung fester Körper (1. Folge). Schweißtechnik, 1973, № 4, pp. 244–248.
84. Festschmierstofflager aus metallischen Grundwerkstoff mit eingedagertem Trockenschmierstoff. "Deutsch. Hebe- und Fordertechn.", 1970, 16. № 2, s. 35–41.
85. Bearing material. Chartered Mechanical Engineering, 1973, 20, № 5, p. 3. New low friction bearing material. Ship Repair Maint. 1973, № 6, p. 17.
86. Permaglide low - friction bearing material. Mach/ and Prod. Eng. 1973. 122, №3158, p. 696.
87. Rogers use of Cooper to prevent scuffing in diesel engines/Wear. 1972, vol, 22, № 2, pp. 245–258.
88. Dwyer M.J. The formation of polymeric films directly on rubbing surface wear. Wear, 26, 173, pp. 369–392.

Глава 3. Области эффективного внедрения фундаментальных открытий в трибологии на основе самоорганизации

Основными областями эффективного внедрения открытий в трибологии являются пять направлений:

1. Металлоплакирующие смазочные материалы.
2. ФАБО рабочих поверхностей трибосопряжений.
3. Реализация безызносного трения при металлообработке.
4. Безразборное восстановление узлов трения.
5. Разработка интеллектуальных материалов для узлов трения и на их основе «универсальных узлов трения» механизмов и машин.

3.1 Металлоплакирующие смазочные материалы

3.1.1. Основные характеристики металлоплакирующих смазочных материалов

Многие десятилетия (более 60 лет) для обеспечения нормального режима работы и снижения износа сопряженных пар трения в смазочные материалы для химического модифицирования поверхностей трения вводились противоизносные – противозадирные присадки, включающие элементы V, VI, VII групп Периодической системы Менделеева, в основном S, C1, P-содержащие соединения в количестве до 15 %.

Общим в механизме действия защиты поверхностей трения таких присадок является образование тонких пленок около 0,1 мкм в виде сульфидов, хлоридов, фосфидов в результате химического взаимодействия присадок или продуктов их химического распада с контактирующими поверхностями.

Роль модифицирующих слоев состоит в насыщении свободных связей кристаллической решетки ювенильных поверхностей, обнажающихся в процессе пластической деформации при трении, и препятствовать их схватыванию и разрушению на глубину.

В случае применения сероорганических соединений (толщина пленки 300...400 Нм), пленка стабильна до ~800°C; при использовании хлорсодержащих соединений образующаяся пленка полимолекулярного слоя хлоридов железа FeCl₂, FeCl₃ стабильна до 300 °C. Пленки фосфидов железа возникают при сравнительно низких температурах (~200 °C). Фосфорсодержащие присадки слабо повышают противозадирные свойства, но обладают антифрикционными. По противозадирным свойствам эффективны присадки, содержащие одновременно серу и хлор. По-видимому, хлориды, образующиеся на поверхности металла, повышают смазочные свойства вследствие большей пластичности, а сульфиды усиливают их действие,

обеспечивая большой противозадирный эффект. При всех режимах трения хлорсодержащие присадки были более эффективны и их активность зависела не столько от содержания хлора в сложной органической молекуле, сколько от подвижности (ср. хлор в алкильной группе и хлор в бензоле).

Помимо термического разложения присадки могут подвергаться и гидролизу и тогда в смазочной среде появляются активные продукты.

Для подавления кислотности, для защиты от коррозии, в смазочную композицию вводились щелочные добавки. Щелочное число являлось одним из показателей ресурса рабочего масла.

Защита трущихся поверхностей применением сложных элементоорганических соединений продолжается до тех пор, пока не израсходовалась присадка, после чего наблюдается ускоренный износ от каталитического действия обнаженного металла и коррозии. Недостатком использования таких присадок является и отсутствие автокомпенсации повреждений и износа.

В связи с ужесточением условий эксплуатации машин и механизмов, большими тепловыми и фрикционными нагрузками, традиционно применяемые элементоорганические присадки не могут удовлетворять требования, предъявляемые к смазочным материалам. В решении этой проблемы получает развитие принципиально новое направление, основанное на научном открытии эффекта безызносности с использованием в узлах трения «металлоплакирующих» смазочных материалов (МСМ), обеспечивающих высокую износостойкость деталей машин, снижение расхода горюче-смазочных материалов и энергозатрат.

3.1.2. Получение и исследование металлоплакирующих смазочных материалов с применением металлов переменной валентности

Металлоплакирование сопряженных поверхностей происходит в процессе работы узла трения при использовании смазочного материала, обеспечивающего условия режима ИП (эффекта безызносности) и существенно отличается от граничного трения, где определяющим является адсорбция смазки и механическое взаимодействие.

Если в качестве присадки используется металлический порошок, то процесс образования пленки этого металла на поверхности трения может осуществляться либо путем намазывания, (заполнения) неровностей, т.е. путем механической адгезии; либо под воздействием больших контактных давлений частицы металла могут вступать во взаимодействие друг с другом и с подложкой и образовывать прочную металлическую связь.

При этом смазочная среда должна быть химически индифферентна по отношению к металлам, но достаточно вязкой для предотвращения слипания и

оседания частиц металла. Такой процесс реализуют для меднения, латунирования различных поверхностей.

При введении в смазочную среду на минеральной или синтетической основе мягких металлов переменной валентности в различных формах соединений (оксиды, гидроксиды, металлоорганические соединения, соли таких металлов, как свинец, олово, хром, медь, цинк, бронза и др.) на поверхностях трения в местах фактического контакта образуется защитная (сервовитная) металлическая пленка толщиной 1...2 мкм, которая в 10 раз превышает толщину пленок, образующихся при использовании смазочных материалов с элементоорганическими присадками. Благоприятное действие пленки металла будет в том случае, если ее толщина в зоне контакта будет в несколько атомных слоев (Боуден).

Для осуществления процесса металлоплакирования в режиме ИП (эффекта безызносности) в смазочном материале наряду с металло-плакирующим соединением необходимо наличие поверхностно-активных веществ (ПАВ) и соединений, способных растворять оксиды металлов и другие продукты.

ПАВ участвуют в образовании комплексов, сольватированных частиц, в создании устойчивой дисперсной системы.

Существенное значение в процессе металлоплакирования имеют электрокинетические явления.

Структура сервовитной пленки.

Свойства сервовитной пленки, образовавшейся в процессе трения, иные чем у обычного металла, полученного из руд. Такое различие обязано условиям образования пленки.

Изучение структуры сервовитной пленки методом скользящего пучка рентгеновских лучей (угол не более 1°) показало, что верхние слои пленки имеют значительные структурные изменения по сравнению с нижележащими слоями. В приповерхностном слое нет скопления дислокаций (повреждений), приводящих к разрушению поверхности, пленка неспособна к наклепу, пориста, имеет малую

сопротивляемость сдвиговым усилиям, низкий коэффициент трения и обладает высокой несущей способностью.

Поверхностно-активные вещества, вводимые в смазочные материалы, или образующиеся при трении в самой смазке, легко хемосорбируются на поверхности такой пленки, образуя хемосорбированный слой (серфинг-пленка), что способствует дополнительному смазыванию и снижению коэффициента трения.

В режиме ИП протекают самоорганизующиеся процессы, приводящие при трении к диссипативной структуре, которая характеризуется:

- гомогенной средой;
- наличием фазового кинетического перехода (переход от консервативного передвижения дислокаций к переползанию);
- обменом энергией и веществом с внешней средой (образование и распад комплексных соединений в смазке);
- ускорением потоков диффузии при пластической деформации.

Благодаря этим процессам диссипативная структура может существовать без финального исхода.

Среди металлов, вводимых в смазочные материалы, наибольшее распространение получила медь и ее производные. Давно известно традиционное использование органических солей меди в качестве гомогенных катализаторов окисления углеводородов.

Позднее была обнаружена способность органических соединений меди к антиокислительному действию и возможность усиления эффективности органических антиоксидантов путем координирования их функциональных групп с соединениями меди.

С открытием эффекта безызносности все чаще стали появляться работы с применением соединений переходных металлов для повышения износостойкости узлов трения и их несущей способности.

Следует заметить, что металлосодержащие добавки чаще всего использовались в консистентных смазочных материалах, буровых растворах, СОТС (смазочно-охлаждающая технологическая среда).

Гораздо меньше рекомендаций по применению их в маслах, что связано, очевидно, с большими требованиями, предъявляемыми к маслам: сохранение реологических свойств, растворимость, стабильность системы и др.

Авторами впервые показана возможность применения неорганических солей – галогенидов металлов переменной валентности, как добавок к маслам для улучшения их триботехнических свойств.

Были исследованы хлориды, бромиды, иодиды металлов: Си, Со, Zn, Sn, Cr, Fe, Al, Cd. Испытаниями на машинах трения МИ-1М и ЧШМ выявлены наиболее эффективные соли: хлориды меди и олова в высшей валентности. Для обеспечения стабильности системы дополнительно в масла вводились присадки С-5А или Дипол-40 и синтезированные в лаборатории азометиновые основания или 2-иминозамещенные индолина. Замена же неорганических солей на

органические (ацетат, нафтенат меди) к улучшению трибологических показателей масла не привела.

Поиск оптимальных концентраций солей, вводимых в масла, позволяющих за минимальное время работы сформировать на поверхностях трения работоспособный слой при минимальном износе в сопряжении, осуществлялся на модернизированной установке МИ-1М.

Эффективность масляных композиций, включающих опытные присадки, содержащие соли хлорида меди (ХМС) и хлорида олова (ХОС), сравнивали с обкаточным маслом ОМ-2, содержащим присадку ксантогенатного типа, с маслом АС-8 + 3% противозадирной присадки ЛЗ-23к и АС-8, принятым за основу.

Результаты испытаний (рис.3.1) показали, что стабилизация момента трения и температуры поверхностных слоев наступила уже через 30...40 мин при более низких значениях этих параметров, чем для масла ОМ-2. При этом износ образцов на масле с ХМС был в 2,3 и 1,6 раза меньше, чем на маслах с присадкой ЛЗ-23к и ОМ-2 соответственно (табл. 3.1).

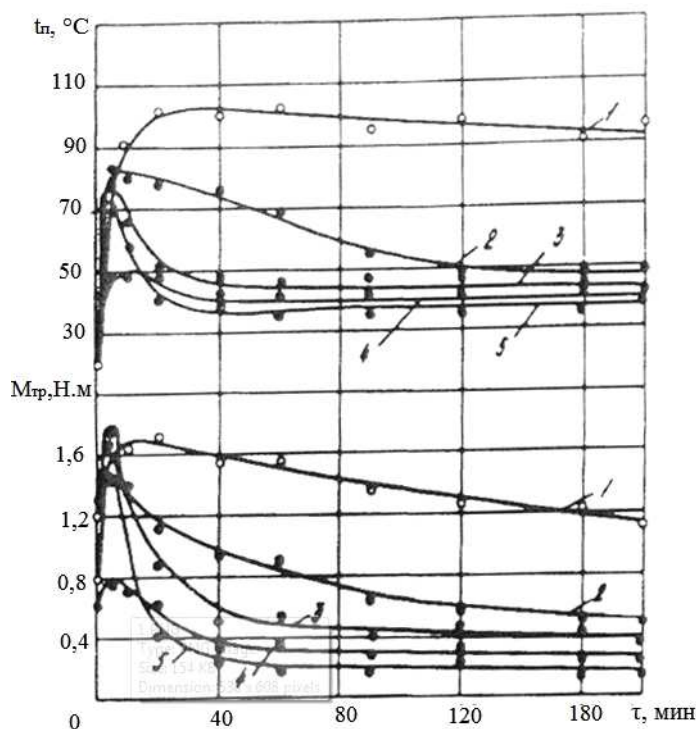


Рис. 3.1. Изменение температуры поверхностных слоев пары колодка–ролик и момента трения на маслах:

1 – АС-8; 2 – АС-8 + 3% ЛЗ-23к; 3 – ОМ-2; 4 – АС-8 + 3% ХОС + 1% С-5А; 5 – АС-8 + 5% ХМС + 1% С-5А

Исследование эффективности композиций при высоких нагрузках показала - при испытании на масле АС-8 схватывание образцов (задир) происходило уже при удельной нагрузке 5,0 МПа, а на масле с присадкой ЛЗ-23к – при 10 МПа. В

случае испытания масел, содержащих хлориды меди и олова, увеличение удельной нагрузки до 12,5 МПа практически не меняет величину момента трения (рис. 3.2).

Таблица 3.1

Триботехнические свойства приработочных масел и опытных масел, содержащих хлориды меди и олова

| Масло | Время приработки, мин | Стабилизированные значения | | | Износ образцов, мг |
|--------------------|-----------------------|----------------------------|---------------------|--------------------------------------|--------------------|
| | | момента трения, М.н | коэффициента трения | температуры поверхности образцов, °С | |
| АС-8 (М-8Б) | 180 | 1,2 | 0,064 | 93 | 13,5 |
| АС-8+3% ЛЗ-23к | 110–120 | 0,6 | 0,032 | 53 | 11,0 |
| ОМ-2 | 40–50 | 0,5 | 0,027 | 35 | 7,8 |
| АС-8+3%ХОС+1% С-5А | 30–40 | 0,3 | 0,016 | 30 | 8,4 |
| АС-8+5%ХМС+1% С-5А | 30–40 | 0,2 | 0,01 | 30 | 4,8 |

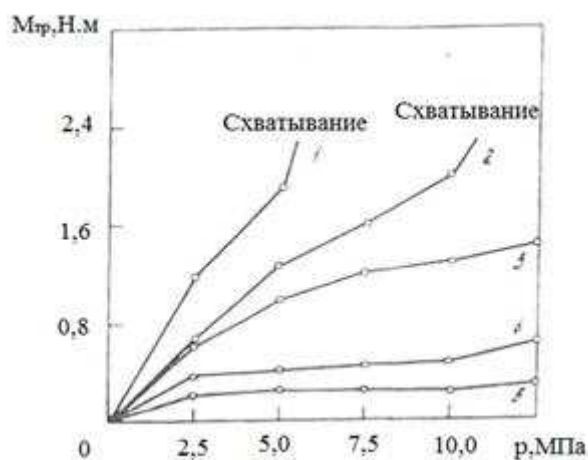


Рис. 3.2. Определение нагрузочной способности масел при испытании на паре трения скольжения:

1 – АС-8; 2 – АС-8 + 5% ЛЗ-23к; 3– ОМ-2; 4 – АС-8 + 3% ХОС + 1% С-5А; 5 – АС-8 + 5%ХМС + 1% С-5А

Положительное воздействие масла с ХМС и ХОС, объясняется, как установлено в процессе экспериментов, образованием на рабочих поверхностях в местах непосредственного контакта сервовитной пленки, содержащей металл вводимой соли.

Исследование этой защитной пленки на стальном образце проводилось с использованием физических методов – фотоэлектронной спектроскопии и электронно-зондового микроанализа.

3.1.3. Инструментальный метод исследования поверхностей трения

С помощью электронного растрового микроскопа Nariba (x2000) получена микрофотография участка наибольшего контакта поверхности трения, смазываемой маслом с ХМС и рентгеновский спектр того же участка, полученный на приставке EDAX. На спектре наблюдались характеристические линии железа, никеля (легирующий элемент стали) и меди.

Распределение медьсодержащих участков на поверхности трения зафиксировано с помощью прибора Camebax, состоящего из электронного растрового микроскопа и электронно-зондового анализатора. Микрофотографии, полученные в рентгеновских лучах $CuK\alpha_{1,2}$ и $FeK\alpha_{1,2}$ свидетельствуют о концентрировании меди в местах фактического контакта.

На рентгено-электронном спектрометре фирмы Хьюлетт-Паккард с анализируемых поверхностей также получены электронные спектры, подтверждающие содержание меди на стальной поверхности, а при использовании масла с ХОС – олова в виде оксидов, Cu_2O , CuO , Fe_2O_3 , SnO_2 (рис. 3.3).

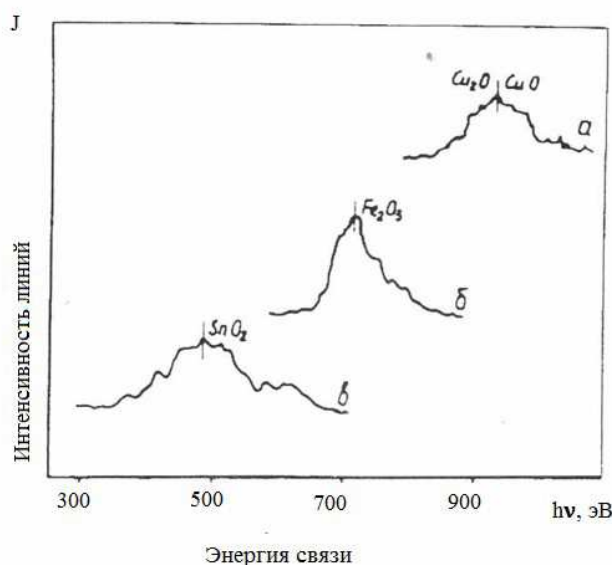


Рис. 3.3. Электронные спектры поверхностей трения после испытания на маслах:

а – АС-8 + 5% ХМС + 1% С-5А; б – АС-8; в – АС-8 + 3% ХОС + 1% С-5А

Таким образом, инструментально доказано, что металлоплакирование рабочих поверхностей (сталь 45) при трении в среде смазочного материала, содержащего хлориды переходных металлов, осуществляется за счет

образования металлосодержащей защитной пленки, которая сконцентрирована на участке фактического контакта.

3.1.4. Особенности кинетики износа пары трения при использовании металлолакирующего смазочного материала

С помощью специального датчика на машине трения, имитирующей пару вал – частичный вкладыш, получена кинетика износа пары трения сталь– сталь на приработочных маслах с ХМС, ХОС и базовом масле М-11 (рис. 3.4). Высокая чувствительность датчика износа позволила фиксировать не только суммарный износ образцов трения, но и проследить образование вторичных структур во времени.

В первоначальный период работы пары трения на исследуемых смазочных композициях наблюдается повышенный износ поверхностей (кривые 2, 3). В дальнейшем износ стабилизируется благодаря образованию металлолакирующей пленки и остается постоянным в течение всего времени испытания. Стабилизация износа характеризует завершение формирования площади контакта (приработки) трущихся деталей и по времени соответствует стабилизации момента трения и температуры п поверхностных слоях (см. рис. 3.4).

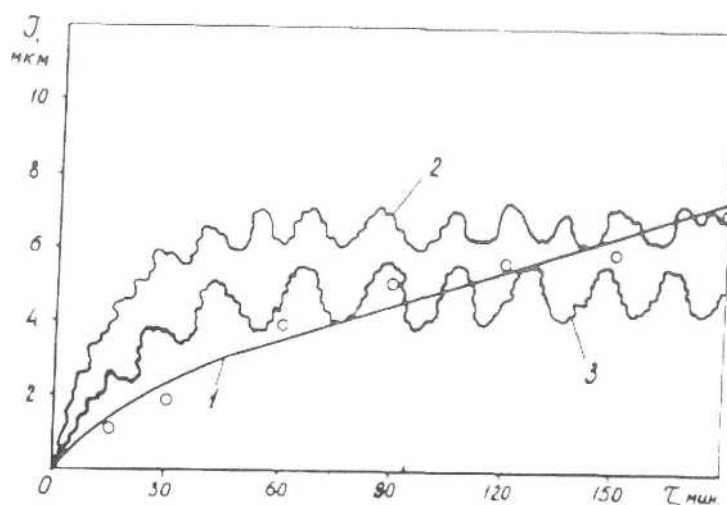


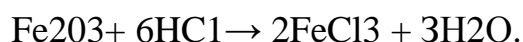
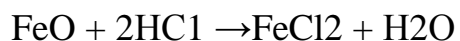
Рис.3.4. Кинетика износа пары трения сталь–сталь на приработочных маслах с ХМС (3), ХОС (2) и базовом М-11 (1)

Размах колебаний кривой износа есть не что иное как толщина пленки, образуемая металлом вводимой присадки, которая составляет для масла с ХМС 1,2...2,0 мкм, а для масла с ХОС – 0,8...1,2 мкм.

Испытания, проведенные на установке МИ-1М по выявлению данной характеристики смазочной композиции с ХМС, и эмиссионный анализ отработанного масла показали, что с увеличением числа приработок время приработки удлиняется. Последнее связано, очевидно, с уменьшением

концентрации меди в масле и накоплением железа в масле по мере увеличения числа приработок.

Наличие ионов Cl^- в смазке в начальной стадии процесса трения способствует быстрому (опережая процессы схватывания) протеканию химических реакций с металлом поверхности трения с образованием защитных слоев – хлоридов железа, которые уже могут обеспечить нормальный режим трения во фрикционном контакте.



В дальнейшем при разрушении химической пленки (хлорида железа) медь или олово, содержащиеся в масле в виде ионов, комплексов или сольватированных частиц, под действием трибо-ЭДС переносятся на ювенильную поверхность в зоне контакта. Восстановление ионов меди, например, до нейтральных частиц возможно как на поверхности трения, так и альдегидами и оксипероксидными радикалами. При более высоких температурах восстановление металла в состоянии высшей валентности может протекать и при участии углеводов.

В результате проведенных теоретических исследований и натурных испытаний созданы смазочные материалы – консистентные смазки широкого профиля, моторные масла с использованием растворимых металлоплакирующих присадок и организовано их многотоннажное производство для железнодорожного и автомобильного транспорта и других отраслей промышленности.

Полученные результаты еще раз подтверждают, что разработанные смазочные материалы, работающие в режиме граничного трения, считающегося разрушительным процессом, приводят к самоорганизующимся созидательным процессам, реализуя низкий коэффициент трения, равный жидкостному, обеспечивая безызносное трение.

На присадки к маслам и пластичным смазочным материалам получено шесть патентов:

- в 2002 г. разработана антифрикционная металлоплакирующая смазка (металлоплакирующий смазочный материал);
- в 2004 г. специалистами корпорации «Сплав ЛТД» учеными В.Г. Бабель, С.М. Мамыкиным и Д.Н. Гаркуновым была создана металлосодержащая маслорастворимая композиция для смазочных материалов ТУ-0257-001-17368431-05, патент РФ 2277579 (далее по тексту МСК «Валена»), используемая в различных смазочных материалах и маслах;

- в 2006 г. разработана консистентный смазочный материал «Металлпакс-П», с использованием МСК «Валена» для подшипников качения буксовых узлов локомотивов и других узлов трения машин и механизмов;
- в 2007 г. разработан смазочный материал «ПУМА-М» с использованием МСК «Валена» для тяжело нагруженных механизмов на железнодорожном транспорте;
- в 2010 г. создана металлоплакирующая, многофункциональная композиция МФК «Сервовит» для моторных, трансмиссионных и промышленных масел.
- в 2012 г. Получен зарубежный патент на композицию МФК «Сервовит» в Германии.

3.1.5. Влияние МСК «Валена» на эксплуатационные свойства современных смазочных материалов

Развитие техники и все более жесткие требования экологов приводят к новым конструкторским решениям и применению новых материалов. Это потребовало и создания смазочных материалов, способных обеспечить устойчивую работу и долгую жизнь узлов трения.

Ведущие мировые производители, находясь в условиях постоянной конкурентной борьбы, интенсивно работают над улучшением смазочных материалов. Применение однородной синтетической основы вместо широкой гаммы углеводородов, входящих в состав масляной фракции, позволило заметно улучшить физико-химические свойства, такие как термическая стабильность, устойчивость к окислению, улучшенные вязкостно-температурные характеристики и т.д.

Добавление целого ряда присадок также улучшает качество масел. Однако все имеет свою цену: стоимость одного литра синтетического масла достигает 20...50 евро. В рекламных статьях производители рассказывают об «умных маслах», которые в зависимости от условий эксплуатации, «включают и выключают» различные присадки. При этом речь идет о периоде замены масла в 12–24 месяца. Много говорится об образовании защитных пленок на рабочих поверхностях, снижающих трение и износ в узле трения, а также температуру смазочной среды.

В последние годы широко применяются присадки на основе нанопорошков, создающих керамические нанопленки (нано – 10^{-9} м). Однако самые идеально обработанные поверхности имеют параметр шероховатости на порядок, а то и несколько порядков больше. Это означает, что защитная пленка не может называться «нано», или она не в состоянии защитить поверхности от прямого контакта.

Появление нового поколения металлоплакирующих присадок, работающих в режиме безызносного трения, позволило разъединить трущиеся поверхности за счет образования квазижидких, пористых пленок из металлов переменной валентности толщиной 1...2 мкм (10^{-6} м). При этом реализуется эффективная защита от водородного износа и охрупчивания поверхностного слоя основного металла. Такие пленки получили название «сервоитные», т.е. сохраняющие, удлиняющие жизнь. Главным отличием сервоитных пленок от классических (химических) является их многократное восстановление в процессе трения (автокомпенсация износа). Все это приводит к значительному увеличению срока службы машин и механизмов.

Путем долговременных эксплуатационных испытаний было проверено влияние МСК «Валена» на работу моторных масел легковых автомобилей.

Для испытаний были отобраны 7 автомобилей 1995–2005 гг. выпуска с пробегом 120...178 тыс. км, как дизельные, так и бензиновые.

Таблица 3.2

Тестовые испытания МСК «Валена» в зарубежных маслах (Германия)

| Модель автомобиля | Двигатель, Л/л.с. | Год выпуска | Пробег, тыс. км | Расход топлива додобавления МСК «Валена» (L /100км) | Расход топлива после добавления МСК «Валена» (L /100км) | Масло |
|--|-------------------|-------------|-----------------|---|---|------------------------|
| Honda Shuttle | 2,2/150 | 1995 | 178 | 13,5 | 12,3 | M 10W-40 Mobil-1 |
| Nissan 200sx 16V Turbo | 1,8/230 | 2003 | 120 | 11,3 | 9,9 | M 10W-40 Mobil-1 |
| BMW 318d Touring | 1,8/90 | 1997 | 140 | 8,1 | 7,3 | MOS2 Leichtlauf 10W-40 |
| Toyota Avensis 2/0 d-4d | 2,0/110 | 2000 | 135 | 8,0 | 7,4 | M 5W-30 longlife |
| Lancia Zeta 2.0 jtd | 2.0/109 | 2001 | 165 | 8,8 | 7,8 | M 5W-30 Selenia |
| VW Transporter T4 TDI | 2,5/102 | 2001 | 152 | 8,9 | 7,9 | M 10W-40 Mobil-1 |
| Citroen Xsara Picasso 1.6 HDI | 1.6/109 | 2005 | 126 | 7,5 | 6,9 | M 10W-40 Leichtlauf |
| Примечание. Период испытания – 1 год; [С] МСК «Валена» = 1 г/л масла | | | | | | |

В качестве рабочих масел применялись масла, рекомендованные производителем данного автомобиля с добавлением 0,1% МСК «Валена». Средний расход топлива определялся суммарным количеством топлива за 12 месяцев и фактическому пробегу автомобиля по показаниям спидометра.

В ходе испытания каждый участник заполнял опросный лист по темам:

- какие изменения в работе двигателя Вы наблюдали;
- запуск холодного автомобиля (в зимний период);
- шум и вибрации;
- приемистость (реакция на резкое нажатие педали газа);
- прочие замечания и наблюдения. Результаты приведены в табл.3.2 и на рис.3.5.

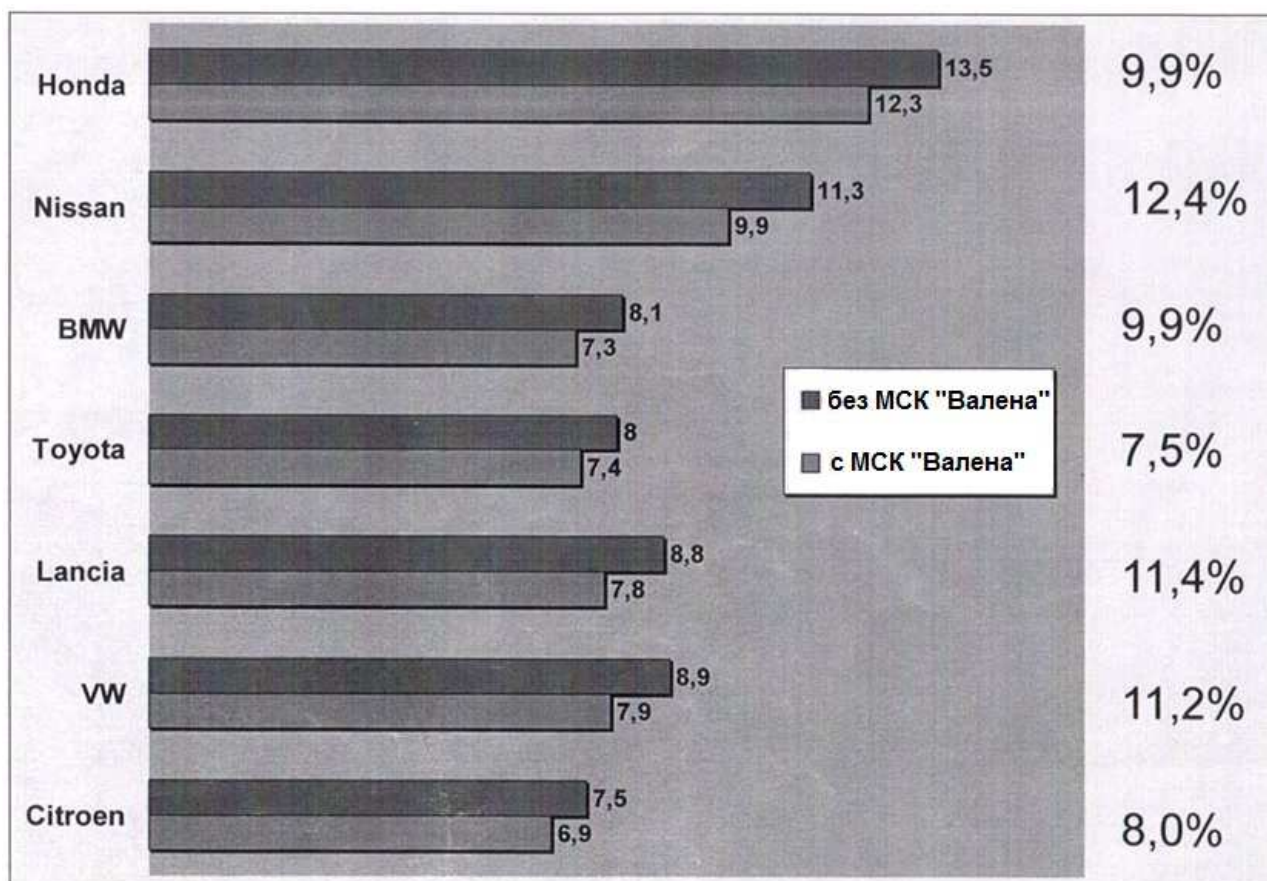


Рис.3.5. Снижение расхода топлива (испытания МСК «Валена» в Германии (L/100)).

Как видно из приведенных данных добавление МСК «Валена» снижает расход топлива на 8,0...2,4 %. Опросные анкеты показали, что уже после 30...50 км двигатель быстрее реагирует на нажатие педали газа, работает тише. Эти изменения продолжались до 300...500 км пробега, после чего режим работы двигателя стабилизировался. В условиях отрицательных температур (-

20...-30 °С) наблюдался уверенный запуск двигателя. При этом в 2–3 раза сокращалось время работы двигателя на повышенных оборотах. Все участники эксперимента отмечали заметное снижение вибрации и шумов при передвижении.

При проведении сервисных работ было установлено, что отработанные масла не густеют, а полностью сохраняют свои реологические свойства. При этом последствие присадки сохраняется на весь следующий сервисный интервал.

Контрольная разборка двигателя в конце испытательного сезона показала полное отсутствие нагаров и лаковых отложений на тяжело нагруженных деталях двигателя. При проведении очередного техосмотра (HU-TUV) было отмечено снижение уровня эмиссии CO, CO₂, NO газов по сравнению с предыдущим замером.

Таким образом, испытания показали, что добавление весьма незначительного количества (≈ 1 г/л) МСК «Валена» к маслам ведущих мировых производителей улучшает и оптимизирует режим работы двигателей внутреннего сгорания и снижает экологическую напряженность.

Наряду с тестовыми испытаниями влияния МСК «Валена» на работу моторных масел разных ДВС, проведены лабораторные исследования зарубежных и российских масел на их термостойкость по методике, разработанной МГТУ им. Н.Э. Баумана, и влиянию МСК «Валена» на снижение температуры саморазогрева масел (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Результаты испытаний масел на термостойкость по температуре саморазогрева масел 10W-40 [С] МСК «Валена» 0,5 %

| Масло | <i>T</i> _к до введения МСК «Валена», °С | <i>T</i> _к после введения МСК «Валена», °С | Снижение температуры, °С |
|---|--|---|--------------------------|
| Лукойл | 127 | 75 | 52 |
| Татнефть | 115 | 70 | 45 |
| Castrol | 127 | 70 | 57 |
| Super Luks | 128 | 75 | 53 |
| Mobil Super | 135 | 80 | 55 |
| Shell Helix | 100 | 70 | 30 |
| Примечание. <i>T</i> _к – конечная температура масла после работы в течение одного часа | | | |

Полученные результаты показали, что при введении в масла (как российские, так и зарубежные) МСК «Валена» в концентрации 0,5 % температура снижалась на 30...57 °С. Такое значительное снижение температуры при трении объясняется образованием на сопряженных поверхностях сервовитной пленки, обладающей низким коэффициентом трения. Данный эффект приводит к сокращению расхода топлива и сбережению масла.

3.2 Финишная антифрикционная безабразивная обработка рабочих поверхностей трибосопряжений

Открытие явления ИП при трении позволило рассматривать перенос металла в зоне фрикционного контакта как метод плакирования поверхностей трения стальных и чугунных деталей тонким слоем мягких металлов (латуни, меди, бронзы), с приданием им высоких антифрикционных свойств. Основопологающим изобретением этого метода является Авторское свидетельство Д.Н. Гаркунова и В.Н. Лозовского № 115744 от 23.4.1958 г. "Способ придания поверхности металлов трущихся пар противозадирных свойств".

Сущность процесса состоит в том, что после окончательной, традиционной обработки резанием (шлифованием, полированием, хонингованием и др.) стальных и чугунных деталей их поверхности трения покрывают тонким слоем (1...3 мкм) латуни, меди или бронзы. Покрытия получают путем трения латунного, медного или бронзового прутка (инструмента) о поверхность детали, смазывая при этом поверхность трения глицерином или какой-либо другой специальной жидкостью. При трении материал прутка переносится на стальную (или чугунную) поверхность детали.

На рис. 3.6 приведена схема обработки детали (болта шарнирного соединения) и приспособления для ФАБО на токарно-винторезном станке.

Для латунирования используются прутки из латуни Л62 диаметром 4 мм.

Удельная нагрузка составила 100... 150 МПа.

Пруток перемещается вдоль детали со скоростью 0,15...0,23 м/с с подачей 0,1...0,2 мм/об. Глицерин наносится на деталь кисточкой.

Для получения высококачественного латунного покрытия достаточно сделать 2–3 прохода. Если при латунировании происходит сильный нагрев детали, вызывающий кипение глицерина, то следует увеличивать продольную подачу латунного прутка. При этом необходимо также увеличивать число проходов. Перед очередным проходом глицерин, покрывающий обрабатываемую сталь, в случае его сильного загрязнения, удаляют ветошью, и на деталь волосяной кисточкой наносят слой свежего глицерина. После снятия со станка латунированные детали тщательно промывают в воде, обдувают сжатым воздухом или насухо протирают чистой ветошью и консервируют.

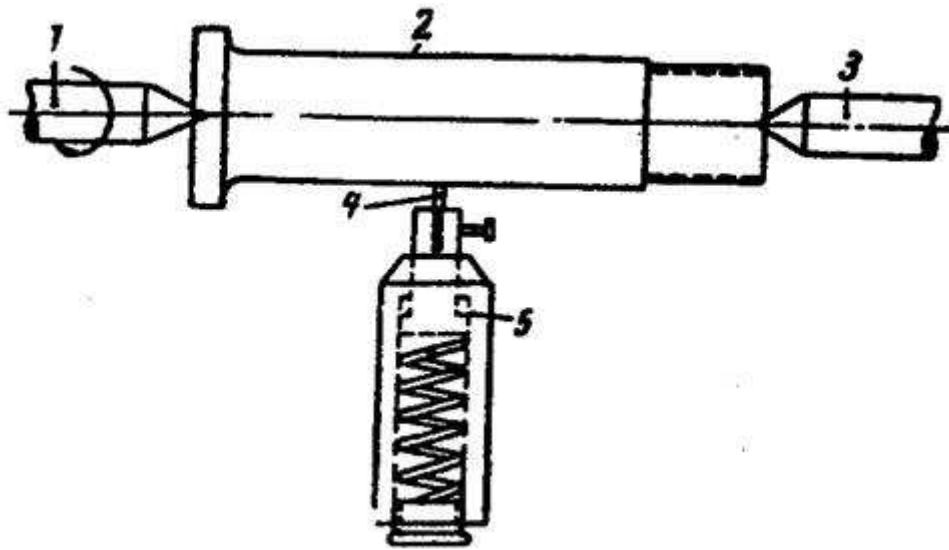


Рис. 3.6 Установка детали и латунного прутка при фрикционном латунировании на токарно-винторезном станке:

1 – центр, закрепленный в шпинделе станка; 2 – латунируемая деталь; 3 – подвижный центр задней бабки; 4 – латунный пруток; 5 – приспособление, закрепленное в резцедержателе станка

Описанная технология использовалась в 1960-е гг. на заводах, производящих ремонт самолетов типа ТУ. ФАБО подвергались шарнирно-болтовые соединения шасси.

На качество процесса влияют следующие факторы:

1. Степень обезжиривания детали и полнота удаления с ее поверхности окисной пленки. Наличие жировых и окисных пленок на поверхности детали не позволяет получить качественное латунное покрытие;
2. Исходная шероховатость поверхности детали. Шероховатость поверхности детали влияет на сплошность латунного покрытия;
3. Величина удельной нагрузки, с которой латунный пруток прижимается к детали. При недостаточном удельном давлении снижается плотность покрытия, а при чрезмерном давлении возможно образование кольцевых рисок на поверхности детали;
4. Скорость скольжения латунного прутка относительно поверхности детали. Отклонение скорости скольжения от оптимального значения в сторону уменьшения снижает производительность процесса, а в сторону увеличения уменьшает толщину покрытия;
5. Величина продольной подачи латунного прутка. Увеличение подачи снижает плотность покрытия, а снижение подачи уменьшает производительность;
6. Величина биения обрабатываемой поверхности детали относительно линии

центров токарного станка. Чем больше биение, тем менее равномерным по толщине получается латунное покрытие;

7. Смачивание поверхности детали глицерином. Отсутствие на поверхности детали слоя глицерина при латунировании приводит к сухому трению и может вызвать повреждение детали.

Технический контроль деталей, латунированных фрикционным методом, осуществляется путем осмотра латунного покрытия с помощью лупы четырехкратного увеличения. При этом не должны быть видны участки поверхности детали, не покрытые слоем латуни, с налипшими отдельными крупными частицами латуни или с кольцевыми рисками.

Для того чтобы наносимый слой латуни был сплошным и ровным, поверхность детали не должна иметь окисных и масляных пленок, а материал латуни нужно пластифицировать поверхностно-активным веществом в процессе нанесения покрытия. Давление при трении должно обеспечивать полное прилегание поверхности латунного прутка к поверхности детали, а также разрушение окисных пленок и очистку обрабатываемой поверхности.

Скорость скольжения при трении способствует разрушению окисных пленок и их удалению, нагреву зоны трения, повышению пластичности инструмента и формированию контакта. Она определяет производительность процесса и качество покрытия. При чрезмерно высокой скорости инструмент не успевает внедряться во впадины поверхности, и покрытие может оказаться не сплошным, кроме того, технологическая жидкость при большой скорости скольжения может потерять вязкость и рабочие свойства.

При оптимальных режимах материал латунного прутка наносится на деталь сплошным слоем, состоящим из очень мелких частиц, хорошо сцепленных как со стальной (или чугуновой) поверхностью, так и между собой.

С этой целью детали, подлежащие латунированию таким методом, обезжиривают, зачищают шлифовальной шкуркой, а сам процесс фрикционного латунирования проводят в среде глицерина. Глицерин в результате малой адсорбционной способности не препятствует непосредственному контакту, а значит, схватыванию металлических поверхностей при трении, он восстанавливает окисные пленки как на стали, так и на латуни, что способствует схватыванию и улучшению условий переноса латуни.

Требования к технологическим жидкостям, применяемым при ФАБО.

Технологическая жидкость должна пластифицировать материал инструмента для создания тонкого поверхностного слоя, разрыхлять окисные пленки на обрабатываемой поверхности, предохранять зону трения от возможного перегрева. Она не должна оказывать коррозионного действия на обрабатываемую деталь. Первоначально в качестве технологической жидкости применялся глицерин. Однако при обработке деталей из легированных сталей

глицерин не способен разрыхлить и восстановить более плотные и сильно связанные с основным металлом сложные окислы хрома, кремния, никеля, молибдена, титана и других элементов. Только введение в глицерин в качестве флюсующей добавки соляной кислоты (на 2 части глицерина 1 часть десяти процентного раствора соляной кислоты или хлористого цинка) позволило получить и на легированных сталях качественное латунное покрытие.

Недостатком глицерина является также и то, что при обработке наружных поверхностей при повышенных скоростях скольжения вследствие жидкотекучести он легко удаляется под действием центробежных сил.

В целях повышения скорости обработки разработан новый состав технологической жидкости повышенной вязкости, который эффективно удаляет окисные пленки на углеродистой и легированной сталях, и хорошо удерживается на обрабатываемой поверхности при скоростях скольжения до 1,0... 1,5 м/с.

По данным литературно-патентного анализа сформулированы основные требования к технологическим жидкостям, которые должны содержать в своем составе:

1. Поверхностно-активные вещества в количестве, позволяющем разрыхлять окисные пленки и пластифицировать обрабатываемую поверхность и натирающий инструмент;
2. Органические материалы, способные при взаимодействии с другими компонентами или в процессе нанесения к полимеризации и образованию на поверхности медьсодержащего покрытия полимерной пленки;
3. Соединения металлов (в основном пластичных) для получения композиционных покрытий с заданными свойствами (металлоплакирующие среды).

Компоненты среды должны находиться в растворенном виде для обеспечения хорошей транспортировки состава подающими устройствами в зону обработки, для чего необходим соответствующий универсальный растворитель.

К техническим жидкостям предъявляется еще ряд технологических требований: оптимальная вязкость, безопасность использования, стабильность, низкая коррозионная активность и др.

Главным критерием качества технологической среды является качество покрытий, получаемых с ее использованием: равномерность образующихся покрытий, маслостойкость (пористость), шероховатость поверхности, толщина покрытия, износостойкость.

Шероховатость обрабатываемой поверхности при ФАБО.

ФАБО снижает шероховатость поверхностей деталей, величина которой после латунирования зависит от материала основы и исходной шероховатости поверхности. Параметр Ra должен иметь значение не ниже 1,25 мкм. В этом случае обеспечивается высокое качество покрытия и высокая производительность (наименьшее число проходов инструмента 1–2), так как микронеровности острой формы детали интенсивно изнашивают инструмент, а продукты износа образуют сплошное покрытие. При значениях $Ra < 0,3$ мкм латунирование затруднено тем, что микрорезание инструмента деталью заменяется пластическим оттеснением, в результате чего интенсивность изнашивания инструмента падает, а постепенный наклеп инструмента на значительную глубину, затрудняет отрыв отдельных частиц и перенос их на деталь. Особенно это характерно для поверхностей, обработанных методами поверхностного пластического деформирования (обкатка роликами, алмазное выглаживание и т. д.), имеющих большой радиус закругления микронеровностей.

При значении параметра шероховатости $Ra = 2,5$ мкм и более грубых шероховатостях сложно обеспечить проникновение материала инструмента во впадины микронеровностей; покрытие в этом случае получается не сплошным. Качественное покрытие на деталях, имеющих грубую регулярношероховатую поверхность, получается при обработке поверхности периферийной частью свободно вращающегося латунного ролика, ось которого расположена к оси детали под углом $75...80^\circ$. В этом случае ролик вращается вследствие трения о деталь, прирабатывается к детали, на его рабочей поверхности формируется ответный микрорельеф, который легко внедряется во впадины микронеровностей и осуществляет натирание вдоль них. По такой схеме можно обрабатывать поверхности, получаемые токарной обработкой, при значениях $Ra = 40..320$ мкм, а также резьбы.

Материал инструмента должен обладать достаточной прочностью, чтобы механически при трении разрушать окисные пленки на обрабатываемой (стальной или чугуновой поверхности). В то же время материал инструмента должен быть и пластичным, чтобы обеспечивать контакт с обрабатываемой поверхностью во многих точках. Прочность инструмента должна значительно уступать прочности обрабатываемой детали. Только в этом случае обеспечивается односторонний перенос материала инструмента на материал детали.

Важным свойством материала инструмента является способность наклепываться в тонком слое в интервале рабочих температур. Упрочнение адгезионного шва за счет наклепа обеспечивает глубинное вырывание и перенос материала покрытия мелкими частицами. Здесь следует иметь в виду и упрочняющее действие материала обрабатываемой детали.

В наибольшей степени всем требованиям к инструменту соответствуют латуни Л63 и ЛС 59-1, в меньшей медь, бронза. При попытке нанести покрытие из таких пластичных материалов, как олово и свинец, оказалось, что они создают хороший контакт с обрабатываемой поверхностью, но не могут произвести ее механическую очистку из-за своей низкой прочности, быстро теряют первоначальную форму, текут, срезаются деталью. Получить качественное покрытие из этих высокопластичных материалов не удалось.

Материал детали должен иметь способность образовывать ювенильную поверхность после того, как будет разрушена окисная пленка. Прочность сложных окислов определяет производительность процесса и возможность его осуществления. Этим требованиям отвечают углеродистые стали и, в меньшей степени, легированные стали. Чугун также поддается латунированию, но при этом сказывается отрицательное влияние графита, препятствующего контакту чистых металлов.

Исследованиями было выявлено, что ФАБО не подвергаются хромированные детали, покрытые никелем и изготовленные из алюминиевых сплавов и некоторых других металлов и сплавов, окисные пленки которых обладают высокими механическими свойствами или способностью мгновенно восстанавливаться после разрушения. Не подвергаются также ФАБО и стальные поверхности с оксидными, фосфатными или какими-либо другими пленками.

Упрочнение поверхностей стальных и чугунных деталей при ФАБО

Благодаря относительно большому давлению P_a (60...80 МПа) в местах контакта при ФАБО происходит упрочнение стальной и чугунной поверхности обрабатываемой детали на глубину до 80 мкм. Этот результат был неожиданным, так как обычно упрочнение поверхности стальных деталей проводится стальными шариками или алмазным наконечником, например при алмазном выглаживании. Здесь мягкий латунный прутки производил упрочнение, причем на достаточно большую глубину. При этом, по-видимому, имело место объемно-напряженное состояние сжатия микрообъемов поверхности, что и упрочняло материал обрабатываемой детали. Это впервые было изучено проф. Г. Польцером и его учениками. Предложенная ими обработка деталей вращающимся прутком еще более способствовала упрочнению поверхности.

На рис. 3.7 показано в обобщенном виде распределение микротвердости чугуна ССЛ25 на разной глубине при латунировании и без покрытия. По результатам исследования можно отметить, что на глубине 70...80 мкм твердость поверхности увеличивается до 30 % по сравнению с твердостью основы. Условия ФАБО (давление, скорость процесса) влияют на характер кривой распределения твердости по глубине.

Данная работа объясняет влияние ФАБО на износостойкость изделия даже после износа латунного покрытия.

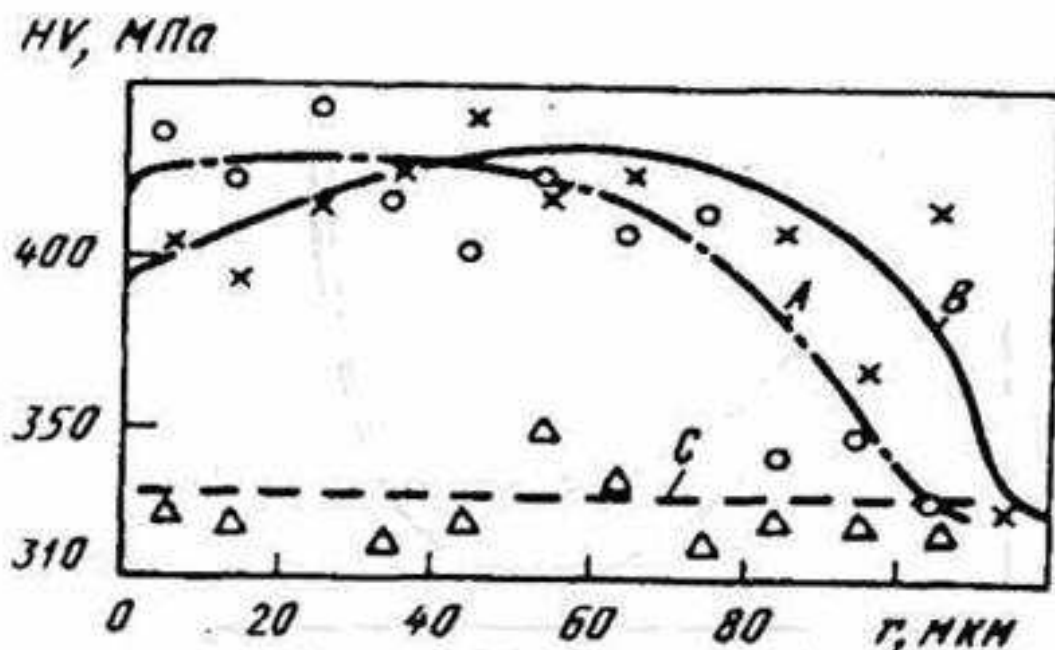


Рис. 3.7 Кривые изменения микротвердости чугуна ССL25 на различной глубине при механическом (А) и химико-механическом (Б) латунировании, а также чугуна без покрытия

Последующие испытания латунированных цилиндров на автомобильном двигателе при отсутствии в масле металлоплакирующей присадки показали, что даже после 70 000 км пробега автомобиля методом радиоактивных изотопов можно обнаружить на поверхности цилиндра следы меди.

Это объясняется тем, что при пластическом деформировании поверхности цилиндра латунным прутком происходит диффузия меди в поверхностные слои материала цилиндра.

Отметим также, что немецкие коллеги здесь впервые применили при обработке зеркала цилиндра вращение латунных прутков, расположенных к поверхности цилиндра под углом.

Это позволило создать линейный контакт между обрабатываемой деталью и инструментом вне зависимости от износа последнего, а следовательно, значительно повысить давление инструмента на обрабатываемую поверхность.

Фрикционное латунирование в парах трения изделий машиностроения может заменять дорогостоящие и вредные для природной среды способы нанесения покрытий, предназначенные для уменьшения трения и износа, например фосфатирование, обработку перегретым паром, азотирование, гальваническое нанесение покрытия из меди и др.

ФАБО деталей топливной аппаратуры

Эксперименты проводили на машине трения 77 МТ-1 с возвратно-поступательным движением, имитирующим работу золотниковой пары при скоростях 100 и 200 двойных ходов в минуту, удельной нагрузке до 20 МПа.

Верхние образцы для машины трения (с малой поверхностью трения) изготавливали из бронз БрАЖМц 10-3-1,5, БрОФ 7-0,2, БрОЦС 5-5-5, БрОС 10-10, БрАЖН 10-4-4, латуней ЛС 59-1 и Л62, нижние образцы — из сталей 30ХГСА, Х12М, ХВГ, 12Х18Н9Т. В качестве смазочных средств использовали химически чистый глицерин и углеводородные виды топлива.

Температуру образцов контролировали хромоникелевой термопарой, установленной в одном из образцов.

После испытаний поверхности наиболее интенсивного трения бронзовых образцов по стали имели зеркальную поверхность цвета меди, а на дорожке трения сопряженного стального образца четко выделялись частички перенесенного сплава того же цвета.

С помощью химического, металлографического, электрохимического, спектрального и рентгеноструктурного анализов было установлено, что эффект ИП проявляется не только в глицерине и спиртоглицериновой смеси, но и в углеводородном топливе, которые являются рабочей средой для деталей топливной аппаратуры.

Однако применение пары сталь – бронза в агрегатах топливной аппаратуры не всегда допустимо, так как при повышении температуры топлива коэффициенты объемного расширения для бронзы и стали различны, а это может привести к изменению зазора в золотниковых парах.

Поэтому на одну из стальных трущихся деталей целесообразно предварительно нанести слой медного сплава, чтобы возбудить ИП в процессе трения в углеводородном топливе, что резко повышает ресурс деталей узла трения.

Детали обрабатывали на токарно-винторезном станке с помощью приспособления, показанного на рис. 3.8.

Фрикционную обработку производят при скорости скольжения прутка 0,1...0,2 м/с, удельной нагрузке 50...70 МПа, продольной подаче 0,1...0,2 мм/об, частоте вращения прутка 200...250 мин⁻¹; диаметре прутка 4...6 мм; числе проходов 2–3.

Для активации процесса растворения химически стойких окислов, образующихся на поверхности детали, в процессе фрикционной обработки применялась среда, состоящая из одной части глицерина и трех частей 10%-ной соляной кислоты.

При латунировании стальной детали толщина покрытия составляет 3...5 мкм, а при бронзировании 1...2 мкм.

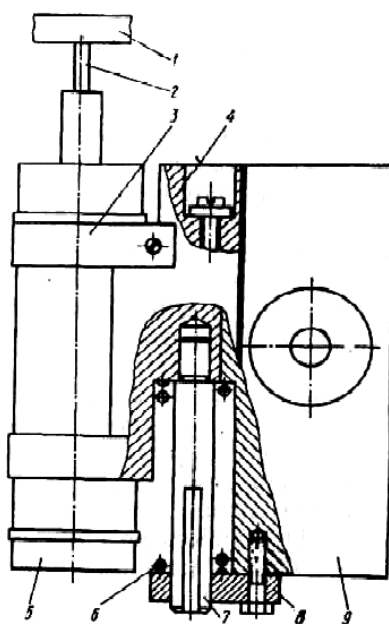


Рис. 3.8 Схема фрикционного латунирования:

1 – обрабатываемая деталь; 2 – пруток; 3 – хомут; 4 – подвижная часть приспособления; 5 – электродвигатель; 6 – пружина; 7 – измерительный штырь; 8 – планка; 9 – корпус

В результате проведенных лабораторных и стендовых испытаний было установлено, что на предварительно нанесенном латунном покрытии образуется медный слой до 1 мкм, который не уносится из зоны контакта, а переходит с одной поверхности на другую, что придает высокую износостойкость узлу трения.

Рентгеноструктурный анализ шлифа на установке УРС-50 с использованием трубки с характеристическим излучением железа в камере РКУ-114М показал, что на поверхности трения присутствуют линии твердого раствора цинка и меди, параметр решетки которого близок к латуни, а также линии фазы, близкой по параметру решетки к чистой меди.

Приближенная оценка содержания цинка в твердом растворе дает следующие результаты: 9 %, когда параметр решетки близок к латуни ($a = 3,70 \text{ \AA}$); 1,7.. .2 % – при параметре решетки близкой к чистой меди ($a = 3,63 \text{ \AA}$). Это свидетельствует о частичном выделении цинка из твердого раствора и обогащении поверхности трения медью, что характерно для режима ИП.

Наиболее распространенной причиной повышения трения, заклинивания и выхода из строя деталей золотниковых регулирующих устройств в эксплуатации, является схватывание трущихся поверхностей. Для выяснения влияния вибрационного режима работы деталей на схватывание были

проведены сравнительные испытания серийных и экспериментальных золотниковых пар.

На экспериментальные золотники наносили покрытия из бронзы типа БрОФ, зазор между золотником и втулкой составлял 9...12 мкм. Испытания проводили в режиме циклических нагрузок, с частотой 175 Гц и колебаниями давления топлива от 3 до 7 МПа.

В результате испытаний установлено, что серийные золотники и втулки после 25 ч работы имеют ярко выраженный характер повреждения поверхностей трения с вырывами и переносом отдельных частиц на сопряженную поверхность; экспериментальные золотники таких повреждений не имеют. В местах контакта втулки с экспериментальным золотником хорошо виден слой меди, выделяющейся из бронзы. Надежность в данном случае повышается, так как слой меди в этих условиях играет роль защитной пленки.

Технологические испытания в течение 105 ч проведены на серийном насосе типа НР в углеводородном топливе. Опыт работы с этими агрегатами показал, что наибольшее число случаев износа рабочих поверхностей приходится на золотник обратной связи, сферы плунжера и дифклапана. Поэтому на них нанесли покрытия латуни Л62.

Микрометрирование деталей после испытаний показало, что все характеристики насоса соответствуют нормам технических условий, износостойкость экспериментальных деталей в 2...3 раза выше, чем серийных.

Сферические поверхности плунжеров и сопряженная с ними наклонная шайба повреждений не имеют (рис. 3.9).

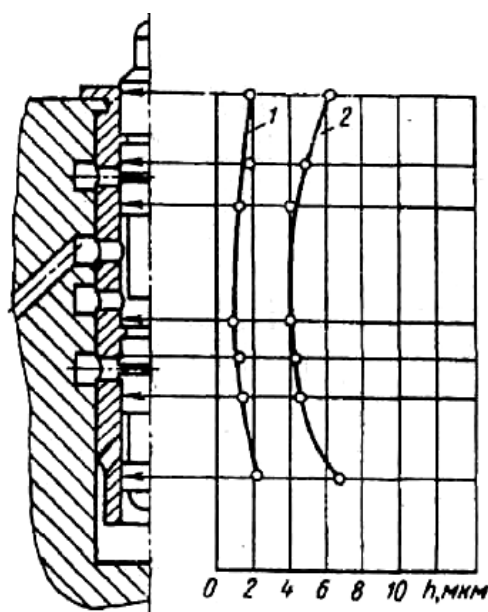


Рис. 3.9. Кривые диаметральных износов серийного (2) и экспериментального (1) золотников ограничителя низкого давления

На рис. 3.10 приведено сравнение диаметрального износа поверхностей золотников.

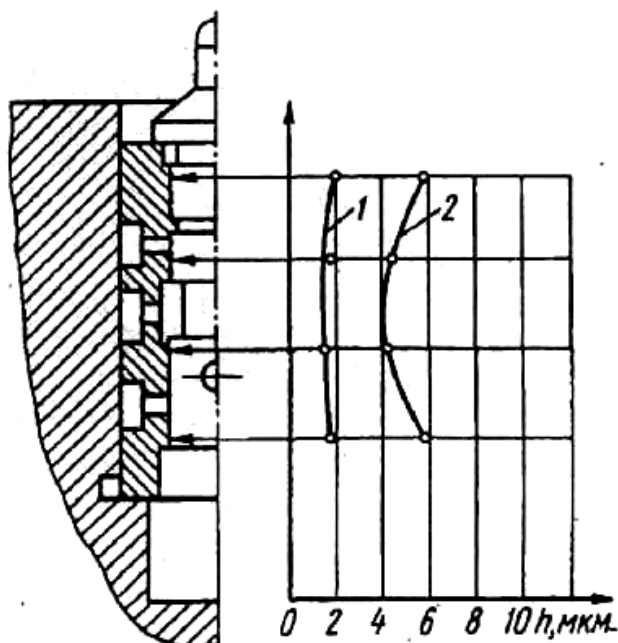


Рис.3.10.Кривые диаметральных износов поверхностей экспериментального (1) и серийного (2) золотников дифклапана

Проведенные испытания показали, что ФАБО деталей топливных агрегатов снижает износ и устраняет схватывание трущихся поверхностей.

ФАБО шеек коленчатых валов двигателей.

Оснастка, технология, состав технологической жидкости и руководство по применению ФАБО шеек коленчатых валов при капитальном ремонте автотракторных двигателей разработана в Московском агроинженерном университете им. В.П. Горячкина. В разработанной технологии процесс нанесения покрытия осуществляется за счет переноса металла натирающего инструмента и восстановления на обрабатываемой поверхности содержащихся в технологической жидкости солей пластичных металлов (меди, олова и цинка). В качестве растворителя использована вода (Пат. РФ № 2004622). На устройство для фрикционного механического нанесения покрытий шеек коленчатых валов получен Пат. РФ № 1834913.

Триботехнические испытания разработанной технологии ФАБО на лабораторных машинах трения показали снижение интенсивности изнашивания обработанных и сопряженных с ними поверхностей в 1,5...2 раза при их 100 %-ной задиростойкости. Наилучшие результаты в процессе испытаний и в эксплуатации двигателей получены ФАБО трущихся поверхностей с применением металлоплакирующих смазочных материалов.

Стендовые испытания разработанной технологии выполнены на двигателях СМД-62: серийных и экспериментальных (опытных) с фрикционными латунными покрытиями на коренных и шатунных шейках коленчатых валов и гильзах цилиндров. В моторное масло М-10Г экспериментальных двигателей вводили металлоплакирующую присадку (МПП) в концентрации 0,5 % мас. В другую группу входили двигатели, прошедшие капитальный ремонт по заводским технологиям. Испытания проводили на одном обкаточном стенде с использованием одного для всех двигателей топливного насоса, комплекта форсунок и турбокомпрессора.

Результаты стендовых испытаний представлены в табл. 3.4. По результатам видно, что ФАБО шеек коленчатого вала и гильз цилиндров и обкатка двигателей на масле М-10Г с МПП, существенно улучшают характеристики работы двигателя:

- снижает механические потери на трение на 5...9 % (в среднем на 8,5 Нм);
- увеличивает давление масла в главной магистрали дизеля на 25...30 % при номинальной частоте вращения (до 0,56 МПа);
- повышает эффективную мощность двигателя после обкатки на 8... 12 кВт (в среднем до 176,5 кВт);
- уменьшает износ шатунных вкладышей на 47...49% (в среднем на 0,019г);
- уменьшает износ коренных вкладышей на 37...49 % (в среднем на 0,042 г);
- уменьшает износ шеек коленчатого вала на 49...56 % (в среднем на 2,9 мкм);
- снижает содержание продуктов износа (железа) в пробах масла из картера двигателя в 4,33 раза (в среднем на 45 г/т).

Таблица 3.4

Результаты стендовых испытаний двигателя

| Технические показатели | Технология | | Изменение показателя, % |
|---|------------|---------|-------------------------|
| | Серийные | Опытные | |
| Момент механических потерь, Нм | 88 | 82 | 6,82 |
| Давление масла, МПа | 0,4 | 0,56 | 40 |
| Эффективная мощность, кВт | 166 | 176 | 6,33 |
| Концентрация продуктов износа (железа) в масле, г/т | 195 | 45 | 76,92 |
| Износ: | | | |
| шатунных вкладышей, г | 0,0365 | 0,019 | 47,95 |
| коренных вкладышей, г | 0,0668 | 0,0418 | 37,43 |
| шеек коленчатого вала, мм | 0,006 | 0,003 | 50 |

Увеличение эффективной мощности двигателя на 8...12 кВт объясняется снижением механических потерь на трение и повышением качества приработки деталей цилиндропоршневой группы и кривошипно-шатунного механизма.

Осмотр поверхностей трения соединений шейка – вкладыш и кольцо – гильза цилиндра после испытаний опытных двигателей не выявил признаков задиров поверхностей трения и образования рисок, тогда как у серийных двигателей, прошедших капитальный ремонт и обкатку по типовым технологиям, выявлено наличие рисок и натиров материала вкладыша на коленчатый вал.

В процессе дальнейшей эксплуатации рекомендуется также использование МПП в применяемых смазочных материалах в целях создания условий для сохранения разделительного слоя пластичного металла и реализации ИП.

После эксплуатационных испытания двигателей СМД-62, а также испытания опытных партий дизелей ЯМЗ-238, RABA-MAN D 2156 и их модификаций разработанная технология внедрена на ряде ремонтных предприятий России.

ФАБО цилиндров двигателей внутреннего сгорания.

Детали цилиндропоршневой группы двигателей работают в напряженных условиях и характеризуются высокими температурами, давлениями и неблагоприятными условиями смазки (от жидкостной до граничной) при возвратно-поступательном движении.

Для оценки влияния фрикционного латунирования цилиндров на противозадирную стойкость проведены лабораторные испытания образцов ролик – колодка на машине трения СМЦ-2. Образцы-колодки, имитирующие зеркало гильзы шероховатостью $Ra = 0,16$ мкм были изготовлены из стали 38Х2МЮА с азотированием рабочей поверхности и из стали с наплавкой поверхности трения сплавом У30Х28Н4С4 (сормайт № 1). Эти материалы характеризуются склонностью к задирам в процессе приработки цилиндропоршневой группы. Рабочую поверхность образцов-колодок покрывали слоем латуни Л62.

Контробразцы (ролики диаметром 50 мм) изготавливали из материалов поршня (алюминиевый сплав АК-4) и стали с хромовым покрытием, имитирующей поршневое кольцо. Поверхности трения этих образцов обрабатывали по технологии, применяющейся в производстве форсированных дизелей.

Рабочую поверхность алюминиевых образцов подвергали закалке и старению (твердость 96 НВ), обрабатывали до $Ra = 0,5$ мкм и анодировали с толщиной пленки 0,06...0,08 мм.

Стальные образцы обрабатывали до $Ra = 0,25$ мкм и покрывали слоем хрома толщиной 0,1... 0,15 мм с последующим дехромированием на глубину 0,03...0,06 мм.

Испытания проводили при окружной скорости 0,78 м/с (300 мин⁻¹) и ступенчатом увеличении нагрузки: через каждые 2 мин по 0,25 МПа до нагрузки 1,5 МПа и далее по 0,5 МПа.

Испытуемые материалы в паре с алюминиевыми роликами работали при ограниченном подводе смазки (одна капля в минуту), а в паре с хромированными роликами работали всухую (колодки и ролики предварительно обезжировали бензином).

Начало схватывания определяли по резкому возрастанию момента силы трения. Нагрузку, соответствующую возникновению задира, считали предельной нагрузкой.

В табл. 3.5 приведены результаты испытаний. Видно, что фрикционное латунирование повышает предельную нагрузку схватывания у твердого сплава У30Х28Н4С4 и азотированной стали 38Х2МЮА при работе в паре с алюминиевым сплавом АК-4 в 1,6...1,7 раза и в 2,3...5,7 раза – в паре с пористым хромом.

Таблица 3.5

| Результаты определения предельной нагрузки | | |
|---|------------------------------------|--------------------------|
| Материал образца | Предельная нагрузка до задира, МПа | |
| | В паре со сплавом АК-4 | В паре с пористым хромом |
| Сталь 38Х2МЮА азотированная | 1,13 | 0,66 |
| Сталь 38Х2МЮА азотированная и латунированная | 1,97 | 3,79 |
| Сплав У30Х28Н4С4 | 1,87 | 1,22 |
| Сплав У30Х28Н4С4 латунированный | 2,99 | 2,75 |

ФАБО азотированных гильз (сталь 38Х2МЮА) гильз диаметром 150 мм и длиной 264 мм выполняли на токарном станке с помощью приспособления, в котором устанавливается два прутка латуни Л62 диаметром 4 мм.

В качестве рабочей жидкости использовали смесь двух частей технического глицерина и одной части 10 %-ного раствора соляной кислоты. Обработанные гильзы тщательно промывали теплой водой, просушивали и консервировали.

Отсутствие при обработке внутренних поверхностей разбрызгивания рабочей жидкости позволили повысить скорость обработки до $v = 0,5...0,6$ м/с

при продольной подаче $s = 0,22$ мм/об вместо ранее принятых $v = 0,15...0,2$ м/с и $s = 0,1... 0,2$ мм/об.

Стендовые испытания проводили на одноцилиндровой установке по ускоренному режиму обкатки (7 ч) при уменьшенном подводе смазки к компрессионным кольцам и увеличенном давлении сгорания. Серийная гильза в таких условиях подвержена значительным задирам и становится практически неработоспособной.

Испытывали гильзы, обработанные различными технологическими методами повышения долговечности: латунированием, фосфатированием, направленным хонингованием с углом наклона в 45° и алмазным вибровыглаживанием. Установлено, что латунирование зеркала цилиндра способствует более удовлетворительной приработке деталей цилиндропоршневой группы, чем сравниваемые.

Рабочие поверхности латунированных гильз имели вид хорошо приработанных, без ярко выраженных следов схватывания и задилов. Латунь при этом полностью изнашивалась, но сыграла роль твердой смазки и обеспечила приработку пары трения раньше своего износа.

Кроме гильз цилиндров, были испытаны латунированные поршни тепловозных дизелей (диаметр 204 мм, длина 324 мм). Материал поршней – специальный чугун, термообработанный до 207...255 НВ. Латунировали поверхность на длине 296 мм от нижнего торца юбки на тех же режимах, что и гильзы. Стендовые испытания в течение 22 ч показали, что качество приработки опытного поршня, обработанного фрикционным методом, не отличается от качества серийных поршней, на боковую поверхность которых нанесен слой олова толщиной 0,02...0,03 мм. Это свидетельствует о целесообразности использования метода фрикционного латунирования рабочих поверхностей для повышения противозадирной стойкости цилиндропоршневой группы.

Технологический процесс ФАБО, разработанный Г. Польцером

Обширные исследования по ФАБО цилиндров двигателей внутреннего сгорания были выполнены в Германии проф. Г. Польцером и его учениками. Предварительно проведенные лабораторные испытания латунированных и нелатунированных валов в паре с чугунным подшипником показали, что этот процесс придает высокие антифрикционные свойства стальным и чугунным поверхностям.

Причем эти свойства сохраняются и после того, как латунное покрытие будет полностью изношено. Следствием этого является то, что при латунировании стальная и чугунная поверхности упрочняются на глубине до 80 мкм.

На рис. 3.11 приведены графики изменения температуры и коэффициента трения в зависимости от времени t работы подшипника. Втулка подшипника – чугун; вал – сталь; смазочный материал – пластичный смазочный материал; удельная нагрузка 9 МПа; скорость скольжения 0,34 м/с.

Научной школой проф. Г. Польцера разработан ряд приспособлений для ФАБО цилиндров двигателей, валов, плоских поверхностей и других деталей.

Приспособления устроены так, что в них натирающий стержень (инструмент) вращается вокруг своей оси. Это позволяет обеспечить: линейное касание элемента и вместе с тем малую реальную площадь его контакта с натираемой поверхностью, что позволяет иметь высокие давления при небольших усилиях прижатия; оптимальные удельные нагрузки – 60...90 МПа, давления по Герцу свыше 700 МПа; постоянное изменение области контакта в процессе латунирования. Оба условия необходимы для того, чтобы с помощью микроадгезионных процессов обеспечить высокое качество покрытия.

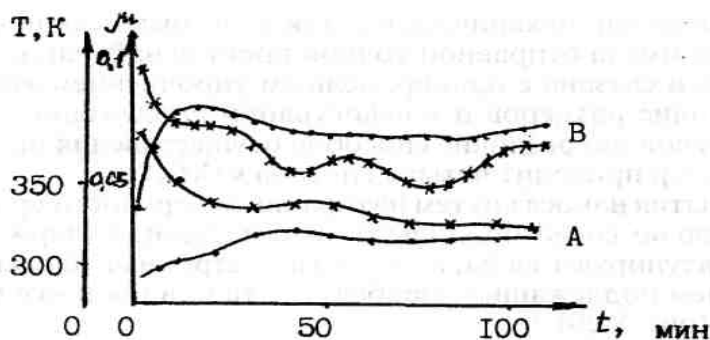


Рис. 3.11. Изменение средней температуры t (1) трущегося тела и коэффициент трения μ (2) в процессе приработки работы чугунного вкладыша со стальным валом для латунированной поверхности (А) и без латунирования (В)

Предлагаются четыре способа ФАБО:

1. Покрытия наносят путем натирания поверхности вращающимся относительно своей продольной оси латунным стержнем. Этим способом латунируют валы, а также симметричные плоские поверхности, вращающиеся в процессе натирания (рис. 3.16,а);
2. Способ обработки внутренних поверхностей вращающихся деталей (например, гильз) и деталей, находящихся при обработке в статическом состоянии (например, блоки цилиндров двигателей). Наибольшее упрочнение стальной и чугунной поверхности при ФАБО происходит тогда, когда между инструментом и обрабатываемой деталью имеется линейный контакт. Такой контакт осуществляется в конструкции оснастки ФАБО цилиндров: два латунных инструмента (прутка) во время работы вращаются;

они установлены к поверхности зеркала цилиндра под углом в 45° рис. (3.16,б);

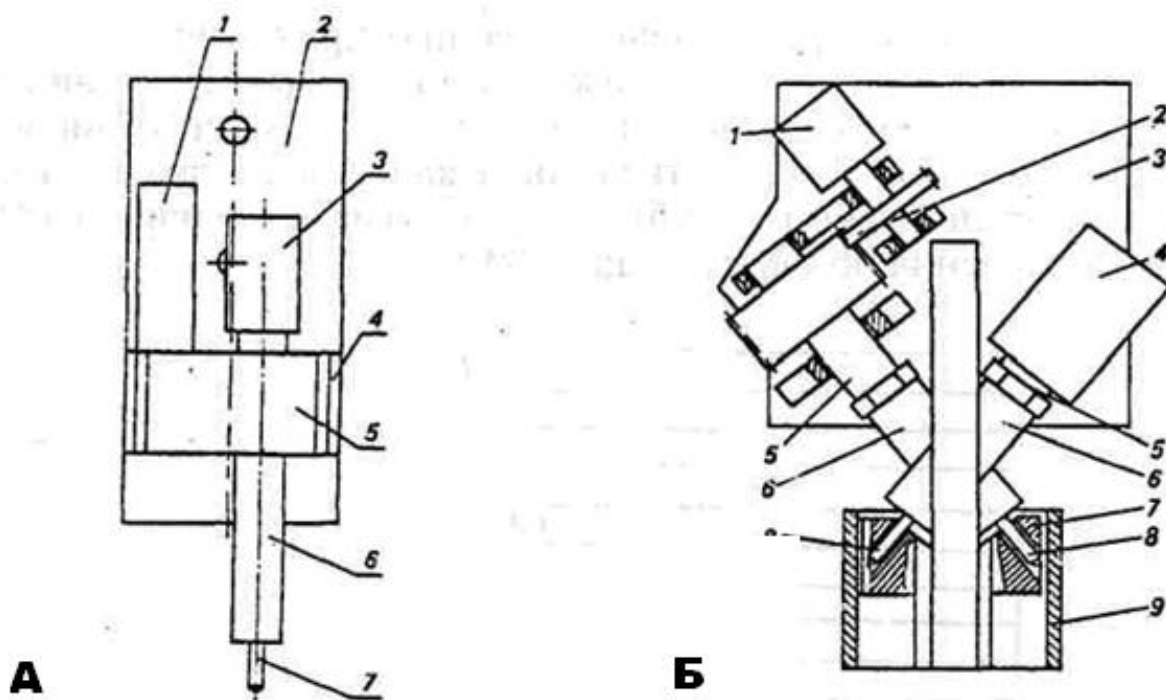


Рис. 3.12.

Приспособление МВ-1 для латунирования валов и плоских поверхностей, устанавливаемое на токарном станке (а):

1 – приводной электродвигатель; 2 – станина; 3 – гидроцилиндр; 4 – направляющие; 5 – червячный редуктор; 6 – натирающий стержень

Приспособление МВ-3А для латунирования гильз (б):

1 – приводной электродвигатель; 2 – зубчатая передача; 3 – основная плита; 4 – гидроцилиндр; 5 – приводной вал; 6 – зажимное устройство; 7 – натирающая головка; 8 – натирающий стержень; 9 – гильза цилиндра ДВС

3. Натираение поверхности одним или спаренными, расположенными оппозиционно, натирающими трубчатыми латунными элементами, которые прижимаются к вращающейся детали (валу или плоской детали). Применение латунных натирающих трубок делает возможным фрикционное латунирование поверхностей с нарушениями сплошности (сверления, канавки, кольцевые углубления);
4. Приспособление для фрикционного латунирования валов, закрепляемых неподвижно.

Разработаны также специальные вспомогательные установочные и зажимные приспособления для закрепления подлежащих покрытию деталей: для разрезных поршневых колец, для закрепления шатунов при натирании их

кольцевых поверхностей, для закрепления плоских некруглых деталей, обеспечивающее их вращение при натирании плоскости.

Особенностью разработанных способов является вращение инструмента (латунного прутка) относительно его продольной оси, что повышает качество ФАБО. К тому же линейный контакт между инструментом и деталью более эффективно упрочняет обрабатываемую поверхность.

Повышение износостойкости цилиндров и сокращение расхода топлива

Для определения влияния ФАБО на износостойкость цилиндров Г. Польцером проведены испытания двухтактного автомобильного двигателя с латунированными и не латунированными цилиндрами.

На рис. 3.13 показаны эпюры износа стенок цилиндров, измеряемых методом вырезанных лунок после условного пробега автомобиля 100 000 км.

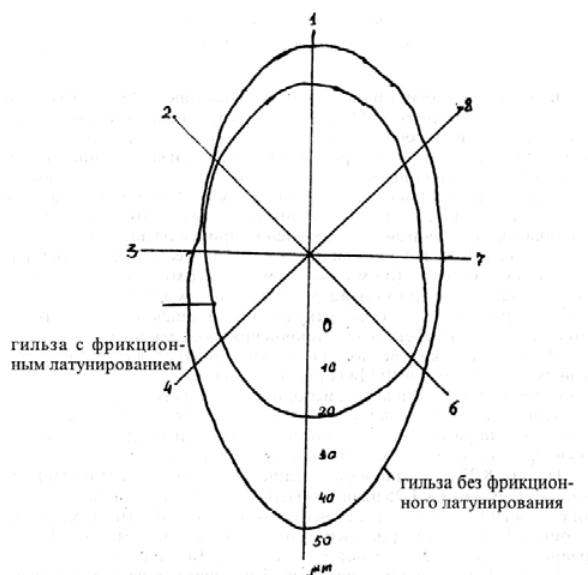
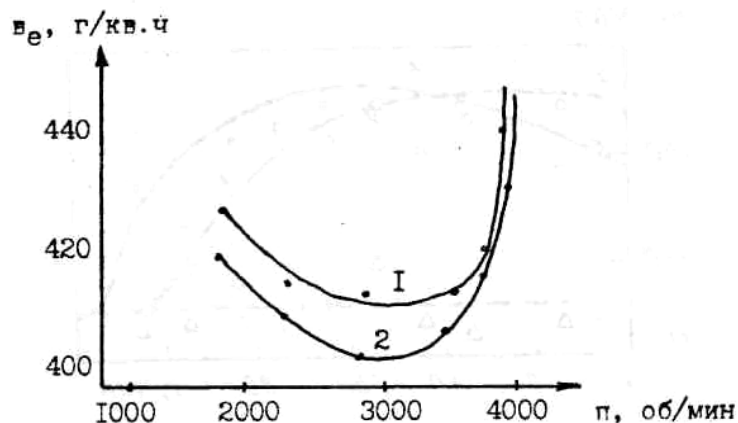


Рис. 3.13. Радиальные распределения износа



3.14. Удельный расход топлива четырехцилиндрового двигателя «Фиат 1300»

Исследовали также влияние ФАБО цилиндров на удельный расход топлива. четырехцилиндрового четырехтактного двигателя «Фиат 1300». Результаты испытаний приведены на рис. 3.14. Как видно, имеется явная тенденция уменьшения расхода топлива при латунированных цилиндрах по сравнению с его расходом при серийных цилиндрах.

Совершенствование технологии ФАБО цилиндров двигателей

Высокая производительность ФАБО гильз цилиндров при высоком качестве нанесенного латунного слоя достигается при использовании серийных хонинговальных головок, в которые устанавливаются бруски из цветных металлов вместо абразивных.

При этом продолжительность обработки одного цилиндра сокращается до 20...30 с.

Предлагается заменять керамические бруски в хонинговальной головке латунными роликами, имеющими по 8 мм выступающих рабочих поясков. Ролики крепятся в центрах, что позволяет им вращаться вокруг своей оси при работе хонинговальной головки. Длина латунного ролика в три раза меньше, чем хонинговального бруска.

Это дает возможность повысить давление на рабочую поверхность цилиндра и тем самым создать условия для интенсивного переноса материала (латуни) с ролика на цилиндр.

При работе хонинговальной головки с четырьмя роликами перенос материала происходит с 32-х рабочих поясков роликов.

Конструкция инструмента обеспечивает линейный контакт при натирании рабочей поверхности цилиндра, высокую удельную нагрузку инструмента на материал цилиндра и упрочнение его поверхностного слоя. В таких условиях не требуется каким-либо образом удалять окисные пленки как с зеркала цилиндра, так с рабочих поясков роликов. Оксидная пленка удаляется под большим давлением самими роликами при их вращении с одновременным возвратно-поступательным движением.

Для получения хорошей латунной пленки достаточно всего двух-трех ходов хона, что обеспечивает высокую производительность при массовой обработке гильз цилиндров.

Более качественный нанесенный слой латуни меньшей пористости, большей прочности сцепления с основным металлом детали получается при электрофрикционном латунировании (при пропускании через зону контакта «латунный стержень – деталь» постоянного тока плотностью 30...50 А/мм² (оптимальная плотность 40 А/мм²) (рис. 3.15).

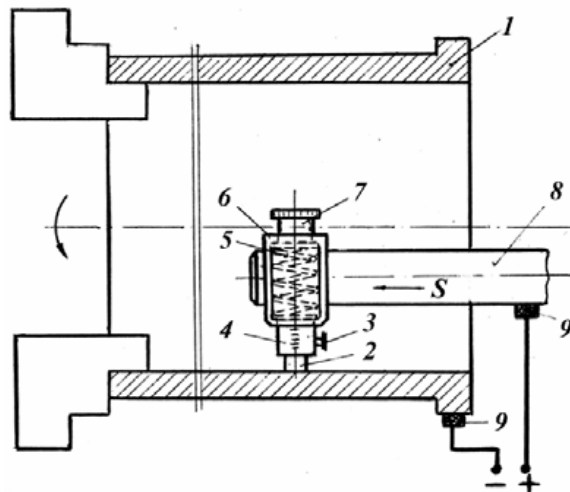


Рис. 3.15. Схема фрикционного (электрофрикционного) латунирования деталей:

1 – латунируемая гильза цилиндра; 2 – латунный пруток (Л-62); 3 – винт крепления прутка; 4 – плунжер; 5 – пружина; 6 – корпус приспособления; 7 – пробка; 8 – оправка, закрепленная в резцедержателе; 9 – электрические контакты.

При этом производительность обработки увеличивается в 2...3 раза, и латунирование выполняется за один проход.

Сплошной плотный слой латуни толщиной 3...4 мкм создает условия ИП при трении и предотвращает задиры и интенсивное изнашивание поверхностей. Результаты испытаний двигателей, топливных насосов, гидронасосов и гидроцилиндров показывают, что износостойкость латунированных деталей увеличивается в 3,5...4,0 раза и более, по сравнению с деталями, изготовленными по обычной технологии.

Следует отметить, что даже при износе деталей, многократно превышающем толщину латунного покрытия, на латунированной поверхности после ее изнашивания иногда виден медный слой.

Этот эффект последствия обработки обеспечивает высокую износостойкость пары трения даже после исчезновения видимых следов латунированного слоя.

Влияние ФАБО деталей на фреттинг-коррозию и усталость

Прочность деталей снижается при гальваническом хромировании и никелировании, фосфатировании, оксидировании и других видах обработки в результате наводороживания.

Исследования показали, что ФАБО деталей увеличивает их сопротивление фреттинг-усталости. Это подтверждается результатами сравнительных усталостных испытаний образцов диаметрами 12 и 17 мм с

напрессованными втулками, подвергнутых нагружению чистым изгибом с вращением.

Образцы и втулки изготавливались из нормализованной стали 35. Для всех образцов методом селективного подбора создавали натяг 20 мкм, что соответствует прессовой посадке.

Сопротивление усталости оценивали по величине предельного циклического напряжения, при котором образцы проработали $2 \cdot 10^7$ циклов без разрушения.

В связи с тем, что фрикционное латунирование проводится при значительных удельных нагрузках, можно ожидать увеличения предела выносливости образцов вследствие наклепа (упрочнения) стальной поверхности. Для сопоставления результатов возможного наклепа при латунировании и самого латунирования испытаниям были подвергнуты образцы трех серий: шлифованные, латунированные фрикционным методом и наклепанные.

Фрикционное латунирование образцов проводили в среде глицерина. Режимы латунирования: окружная скорость образцов – 0,2 м/с; продольная подача латунного прутка – 0,2 мм/об; давление латунного прутка – 100 МПа; число проходов – 2.

Наклеп образца проводили в условиях, максимально приближенных к фрикционному латунированию. Однако для предотвращения осаждения пленки латуни обрабатываемая поверхность покрывалась не глицерином, а пластичной смазкой АФ-70 (смазочный материал УНМА).

Как следует из кривых усталости (рис. 3.16.), построенных по результатам испытаний латунированных, наклепанных и шлифованных образцов диаметром 17 мм, фрикционное латунирование способствует увеличению предела выносливости образцов до $\sigma_a = 185$ МПа по сравнению с 105 МПа для шлифованных образцов.

Это увеличение не является следствием наклепа образцов при латунировании — форма кривой усталости и значение предела выносливости (для выбранной базы испытаний $N = 2 \cdot 10^7$ циклов) для образцов шлифованных и наклепанных совпадают.

Дальнейшие исследования показали, что на величину предельного циклического напряжения значительное влияние оказывает состав среды, применяемой в процессе латунирования. Была найдена концентрация раствора соляной кислоты в глицерине, при которой предел выносливости латунированных образцов диаметром 12 мм с напрессованными втулками возрос до 206 МПа, а величина давления прутка при латунировании снизилась до 70 МПа.

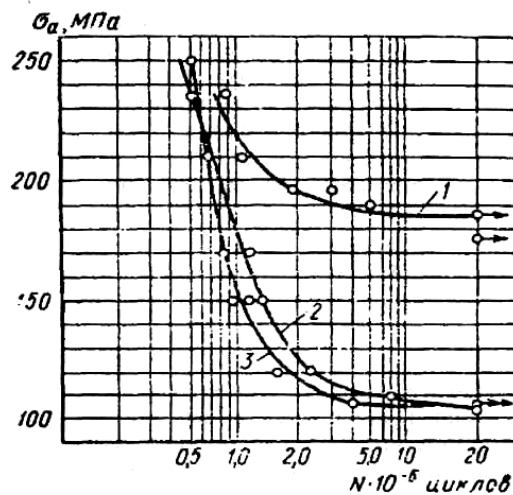


Рис. 3.16. Кривые усталости образцов диаметром 17 мм с напрессованными втулками:

1 – латунированные образцы; 2 – наклепанные образцы; 3 – образцы без покрытия

Для изучения механизма увеличения сопротивления усталости фрикционным латунированием были проведены металлографические исследования характера повреждений образцов в процессе деформации, видоизменяющей фреттинг-процесс.

В результате исследований испытанные образцы разделили на три группы в зависимости от степени фреттинг-коррозионных повреждений и характера разрушения.

1. Образцы, испытывавшиеся при напряжениях $\sigma_a = (0,9...1,6)\sigma^{-1}$. У этих образцов в зоне, примыкающей к кромке втулки, по всему периметру наблюдается четко выраженный поясик коррозионных повреждений шириной 1,5...2,5 мм из окислов черно-бурого цвета. Поверхность контакта на контрольных (не латунированных) образцах повреждена фреттинг-коррозией в большей степени чем на латунированных. Окислы на латунированной поверхности образуются в основном за счет разрушения стальной втулки. Это подтверждается тем, что при удалении окислов обнажается латунная пленка. Трещин на этих образцах, проработавших без разрушения в течение $2 \cdot 10^7$ циклов, не обнаружено.
2. Образцы, испытывавшиеся при $\sigma_a = (0,1...1,3)\sigma^{-1}$. С увеличением действующих напряжений интенсивность фреттинг-коррозионных повреждений несколько уменьшается; однако на поверхностях легко обнаруживаются трещины, которые располагаются не только вблизи излома, но и проникают вглубь (более крупные – у излома, менее крупные – на расстоянии до 3,5 мм). Как правило, трещины направлены в сторону от зоны возможного разрушения под углом $60...70^\circ$ к контактной поверхности.

3. Образцы, испытывавшиеся при $\sigma_a = (1,3...1,6)\sigma^{-1}$. При высоких напряжениях влияние латунирования проявляется особенно заметно. Изменяется форма контактной поверхности, пластически деформируется материал в при контактной области. У нелатунированных образцов форма контактной поверхности не изменяется в ходе испытаний: линия контакта остается ровной. У латунированных образцов линия контакта волнистая. Различие в структуре приповерхностных областей состоит в том, что у латунированных образцов наблюдаются значительные области пластической деформации, в то время как у не латунированных таких областей нет, и зарождающиеся трещины имеют чисто усталостный характер.

Пластифицирующее действие латунной пленки проявляется в процессе работы прессового соединения. Линия контакта искривляется за счет того, что в приповерхностных областях образуются зоны пластической деформации.

Особенно велика зона деформации в области концентрации напряжений — у кромки втулки. На валике, проработавшем $3,3 \cdot 10^6$ циклов при $\sigma_a = 210$ МПа слой упрочненного, пластически деформированного материала имел протяженность около 5 мм.

Таким образом, фрикционное латунирование способствует повышению предела выносливости узлов, детали которых собраны с гарантированным натягом, за счет пластифицирования материала в зоне контакта, препятствующего зарождению усталостных трещин.

Влияние ФАБО на наводороживание рабочей поверхности цилиндров

Г. Польцером и его сотрудниками были проведены тщательные исследования по определению концентрации водорода и его распределению в материале цилиндров двигателей внутреннего сгорания в зоне мертвой точки, как при ФАБО, так и без него (рис. 3.17).

Концентрацию водорода с точностью до 0,1 % ат. определяли методом радиоактивного анализа (ядерной спектроскопии). Образцы, вырезанные из цилиндров двигателей, исследовали на глубину до 0,8 мкм.

Изменение концентрации водорода C_H по глубине образцов, вырезанных из гильзы дизельного двигателя до начала и после 212 ч его эксплуатации. А – механически латунированные гильзы; Б – серийные гильзы.

Изменение концентрации водорода по глубине в образцах, вырезанных из гильз цилиндров четырехтактного дизельного двигателя до начала его эксплуатации, а на — то же после наработки двигателем 212 ч при механически латунированных и не латунированных поверхностях.

Из рис. 3.17 отчетливо видно снижение концентрации водорода при латунировании цилиндров, что естественно отражается на их износостойкости.

Результаты применения ФАБО

Применение технологии ФАБО дает следующие результаты:

1. Более высокая надежность и повышение коэффициента полезного действия двигателей внутреннего сгорания автомобилей, насосов и компрессоров, гидравлических агрегатов, прецизионных машин, металлорежущих станков;
2. Чрезвычайно низкий расход материала;
3. Низкий расход механической энергии;
4. Безвредность для окружающей среды;
5. Малое время нанесения покрытия (несколько минут) помощью автоматизированного приспособления;
6. Стабильное и хорошее качество покрытий;
7. Замена дорогостоящих способов обработки поверхности;

Экономическая целесообразность даже при малой серийности изделий. Эффект фрикционного латунирования проявляется также в следующем:

1. Снижении износа на 40 % в смазанных парах трения из стали и чугуна;
2. Большой производительности в результате повышения КПД;
3. Устранении склонности к схватыванию;
4. Применении этого способа в процессе приработки;
5. Способности слоев к саморегенерации, обеспечивающей длительный эффект действия;
6. Экономии энергии вследствие уменьшения коэффициента трения.

Области применения:

1. Пары трения, особенно из высококачественной стали, и чугуна;
2. Детали цилиндрической и плоской формы;
3. При смазывании пары трения большинством смазочных материалов, а также водой, кислотами, щелочами;
4. Особенно полезен этот способ при высокой склонности поверхности к схватыванию и небольшому абразивному разрушению зоны трения;
5. В целях предотвращения окисления поверхностей при трении;
6. Для повышения предела усталости деталей из стали или чугуна.

Фрикционное латунирование можно рекомендовать также для крайне тяжело нагруженных деталей, так как этот способ создан на основе эффекта ИП, и защитные слои в определенных условиях самовосстанавливаются и регенерируются. При этом обеспечивается низкий уровень окисления в областях трения с применением различных смазочных материалов, а также воды.

Применение латунных поршневых колец

Несмотря на имеющийся опыт использования ФАБО для цилиндров, до настоящего времени широкомасштабного применения эта технология не нашла ни в нашей стране, ни за рубежом по двум причинам.

1. Существующие конструкции оснастки ФАБО цилиндров не обеспечивают необходимой производительности при массовом изготовлении цилиндров. Это связано с тем, что натирающими элементами (инструментом) являются всего лишь 1...3 латунных прутка диаметром 3...4 мм, что вынуждает выполнять несколько проходов инструмента, чтобы покрыть латунной пленкой всю поверхность зеркала цилиндра. Для этого требует пять и более минут на один цилиндр двигателя.
2. Разработанные технологии ФАБО цилиндров не дают необходимого упрочнения рабочей поверхности (зеркала) цилиндра, что не позволяет обеспечить его износостойкость на более длительный срок службы (в автомобильных двигателях, по данным немецких специалистов, до 70 000 км пробега). Это объясняется также незначительной толщиной натираемого слоя цветного металла при ФАБО (2...4 мкм), по сравнению с величиной износа гильз (до 200 мкм и более).

При выборе способа создания условий ИП в сопряжениях следует учитывать некоторые особенности изнашивания деталей на наиболее неблагоприятных режимах, например, ЦПГ на пусковых режимах двигателя, длительную задержку поступления масла в верхнюю зону гильз после запуска, и недостаточное количество смазки при работе двигателя на номинальных режимах.

Поэтому представляется целесообразным создавать условия самоорганизации ИП для деталей ЦПГ двигателей непрерывно в процессе работы двигателя. Это обеспечивается установкой бронзовых, латунных, медных вставок в поршневые кольца, или установкой на поршень цельных колец, изготовленных из цветных металлов.

Из-за малых размеров поршневых колец автотракторных двигателей и значительных трудностей установки в них цветных вставок, рекомендуется устанавливать на поршень одно цельное латунное или бронзовое кольцо (взамен уплотнительного), которое предназначено в основном для создания медной сервовитной пленки на трущихся поверхностях деталей ЦПГ. Применение таких колец-доноров ионов меди обосновано также тем, что с

целью снижения потерь на трение в настоящее время уменьшают количество уплотнительных (компрессионных) колец (с трех до двух) на поршне быстроходных д.в.с. Поскольку прорыв газов из камеры сгорания предотвращается в основном двумя верхними кольцами (давление газов в радиальном зазоре третьего поршневого кольца P_3 составляет менее 10 % давления P_z), снятие или замена третьего кольца практически не снижает величину сжатия в цилиндре (рис. 3.17).

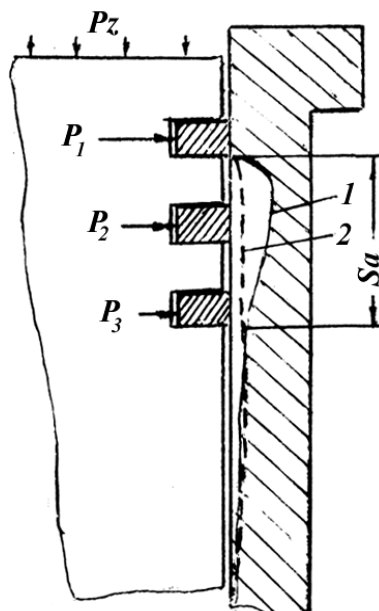


Рис. 3.17. Схема установки уплотнительных колец на поршне и эпюра максимального износа верхней зоны гильз цилиндров на режимах пуска в условиях эксплуатации (1) и при позднем впрыске топлива (2).

P_1, P_2, P_3 - давление газов в радиальном зазоре кольцо-канавка, прижимающее I, II и III поршневое кольцо к стенке гильзы, равное соответственно 0,76, 0,20 и 0,08 максимального давления сгорания топлива в цилиндре P_z

Результаты испытаний трех двигателей СМД-14БН с установленными латунными или бронзовыми кольцами (вместо второго и третьего чугунных) показали возможность применения и эффективность данного способа создания условий ИП при трении деталей ЦПГ.

Двигатели испытывали на пусковых режимах на обкаточно-тормозном стенде (теплые пуски), а также в зимнее время с применением легковоспламеняющейся пусковой жидкости «Д-40 Холод» («холодные пуски»).

Износ деталей определяли взвешиванием (поршневые кольца и вкладыши подшипников коленчатого вала) и микрометрированием (гильзы цилиндров и шатунные шейки коленчатого вала); скорость изнашивания деталей контролировали спектральным анализом проб работавшего масла.

В цилиндрах с латунными и бронзовыми кольцами верхние хромированные кольца за время приработки изнашивались на 20 % меньше, а на режиме пуска-разгона двигателя – на 30 % меньше, по сравнению с контрольными. На этих режимах испытаний наблюдается довольно значительное снижение относительного износа третьего чугунного поршневого кольца, расположенного непосредственно под латунным кольцом, установленным во второй канавке поршня (до 0,78 и 0,49 соответственно).

Эксплуатационные испытания двигателя в течение 74 ч подтвердили снижение износа уплотнительных поршневых колец, работающих в комплекте с латунными и бронзовыми кольцами. Однако из-за поломки хрупкого бронзового кольца в других двигателях устанавливали латунные кольца.

При испытании двигателя на более тяжелых режимах «холодного пуска» в цилиндрах с латунными кольцами, установленными в третьей канавке, износ верхнего хромированного кольца уменьшился до 0,64, а первого и второго маслосъемных – до 0,72 и 0,59 износа соответствующих колец в контрольных цилиндрах (рис. 3.18).

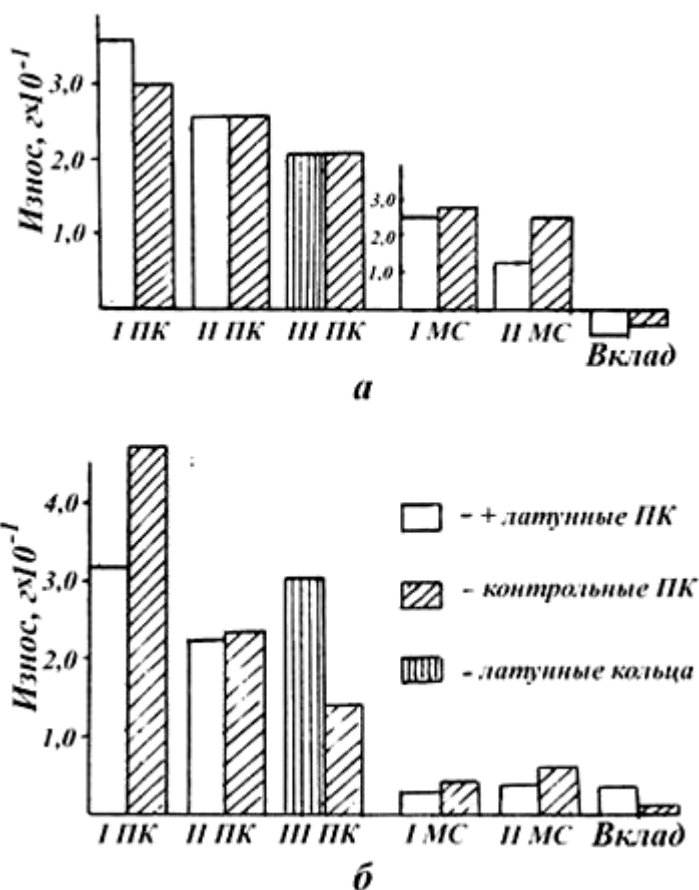


Рис. 3.18. Износ уплотнительных (ПК) и маслосъемных (МС) поршневых колец и вкладышей подшипников коленчатого вала двигателя СМД-14Н за время обкатки (а) и на пусковых режимах зимой с применением пусковой легковоспламеняющейся жидкости (б)

Анализ результатов испытаний показывает, что чем тяжелее условия работы и интенсивнее изнашивание латунных колец под воздействием динамических нагрузочных факторов на пусковых режимах, тем заметнее уменьшение износа компрессионных и маслосъемных поршневых колец. Поэтому для повышения срока службы наиболее нагруженных верхних хромированных ПК, довольно часто ограничивающих наработку двигателя до ремонта, целесообразно латунные кольца устанавливать в верхней канавке поршня, а хромированные – во второй.

Однако за время обкатки двигателя на стенде в течение 8 ч увеличился (в 2,28 раза) относительный износ латунных колец в верхней поршневой канавке всех цилиндров, по сравнению с износом хромированных колец, установленных во второй канавке. Это объясняется неблагоприятными условиями граничной смазки, высокой температурой деталей, высоким давлением сгорания топлива P_z и жесткостью рабочего процесса $dP/d\varphi$ в цилиндре двигателя.

Износ цветных колец способствует снижению износа основных деталей ЦПГ двигателя. При этом весьма существенно (в 10–15 раз) уменьшился износ маслосъемных колец.

Эффективность способа создания условий ИП при трении деталей ЦПГ установкой на поршень латунных колец проверялась также более длительными эксплуатационными испытаниями двигателей ВАЗ-2101, УМЗ, СМД-14Н в производственных условиях.

При испытании двигателя ВАЗ-2101, у которого на поршне устанавливается два компрессионных кольца, латунным кольцом заменяли чугунное заводское кольцо во второй канавке первого и третьего цилиндров.

Поршневые кольца второго и четвертого цилиндров оставались контрольными для сравнения величины износа.

Результаты измерений компрессии на различных этапах подготовки испытаний двигателя показывают, что установка латунных поршневых колец в первый и третий цилиндр двигателя не уменьшила компрессию в них.

Латунное поршневое кольцо предназначалось, прежде всего, для создания условий ИП (как источник-донор меди), тем не менее, латунное поршневое кольцо выполняет также роль компрессионного

Весовой износ поршневых колец за период обкатки двигателя приведен в табл. 3.6

Средний весовой износ первых хромированных поршневых колец первого и третьего цилиндров, работавших в комплекте с латунными кольцами, на 25...40% меньше контрольных серийных колец второго и четвертого цилиндров, а маслосъемных – в 2,3 раза.

Износ чугунных поршневых колец во второй канавке контрольных цилиндров в 3,5...4,8 раза больше износа верхних хромированных колец.

Однако недопустим большой износ латунных колец – в три раза больше, чем серийного чугунного (табл. 3.6) .

Отсюда следует, что латунное поршневое кольцо действительно служит донором меди, что подтверждается не только его интенсивным износом, но и некоторым увеличением содержания меди и цинка в пробах масла.

Таблица 3.6

Потеря массы (весовой износ) поршневых колец

| Номер цилиндра | Применяемые кольца | Потери массы поршневых колец | | | | | |
|----------------|----------------------|------------------------------|------|---------------------------|------|--------------|------|
| | | Верхнее компрессионное | | Компрессионное и латунное | | Маслосъемное | |
| | | г | % | г | % | г | % |
| 1 | Заводские + латунное | 0,0202 | 0,26 | 0,2791 | 2,44 | 0,0011 | 0,01 |
| 2 | заводские | 0,0242 | 0,31 | 0,0820 | 0,86 | 0,0359 | 0,34 |
| 3 | Заводские + латунное | 0,0205 | 0,26 | 0,3152 | 2,77 | 0,0332 | 0,31 |
| 4 | Заводские | 0,0267 | 0,35 | 0,1002 | 1,06 | 0,0456 | 0,44 |

Рентгеноспектральный анализ рабочей поверхности поршневых колец после испытаний двигателя показал незначительное присутствие на ней меди и цинка. Вероятно, эти элементы, содержащиеся в латунных поршневых кольцах, плохо откладываются на хромированной поверхности серийных колец, и, прежде всего, наносятся на рабочую поверхность гильз цилиндров.

При испытании автомобильного двигателя УМЗ в двух цилиндрах устанавливали латунные кольца в первой поршневой канавке, устанавливая хромированное кольцо – во вторую канавку. В остальных двух цилиндрах латунные кольца устанавливали во второй поршневой канавке взамен чугунных колец.

Латунные кольца работали как доноры меди и как уплотнительные кольца, обеспечивая необходимое давление сжатия в цилиндрах. Это подтвердили результаты периодических измерений компрессии в цилиндрах и данные рентгеноспектрального анализа проб моторного масла.

После пробега автомобиля 7,7 тыс. км весовой износ латунных колец во второй и, особенно в первой поршневой канавке также оказался недопустимо большим, ограничивающим ресурс двигателя. При этом прямоугольное сечение колец приняло форму тавра вследствие износа верхней и нижней поверхностей.

Полученные данные показали явно недостаточную долговечность латунных поршневых колец, устанавливаемых в первой и второй поршневой канавках высокофорсированных двигателей.

В связи с этим в тракторном двигателе СМД-14Н латунные поршневые кольца устанавливали только в третью поршневую канавку всех цилиндров.

Пробы работавшего масла брали через 1 ч («нулевая» проба), а также через 50 и 100 мото-часов работы двигателя. Для получения сравнительных данных брали пробы моторного масла из контрольного двигателя, работавшего в этих же условиях.

В пробах свежего масла двигателя с латунными кольцами содержание цинка (оцениваемое по скорости счета) оказалось примерно в 10 раз меньше, чем в масле контрольного двигателя (табл. 3.7).

Таблица 3.7

**Относительное содержание элементов в пробах моторного масла, %
(числитель) и скорость счета, имп/с (знаменатель)**

| Проба масла | Fe | Cr | Cu | Zn | Mn |
|-----------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|
| Свежее | <u>3,81</u> | <u>0,20</u> | <u>79,30</u> | <u>16,41</u> | <u>0,27</u> |
| | 542 | 29 | 11269 | 2332 | 38 |
| 0 (через 1ч) | <u>7,93</u> | <u>0,25</u> | <u>74,34</u> | <u>17,08</u> | <u>0,40</u> |
| | 1299 | 41 | 12182 | 2799 | 66 |
| 50 (мото-час) | <u>5,47</u> | <u>0,25</u> | <u>56,46</u> | <u>37,63</u> | <u>0,19</u> |
| | 1185 | 54 | 12243 | 8159 | 42 |
| 100 (мото-ас) | <u>4,69</u> | <u>0,38</u> | <u>48,24</u> | <u>46,42</u> | <u>0,28</u> |
| | 1041 | 84 | 10701 | 10297 | 61 |
| Контрольный двигатель | | | | | |
| 0 (1 мото-час) | <u>8,15</u> | <u>0,26</u> | <u>46,75</u> | <u>44,60</u> | <u>0,24</u> |
| | 2237 | 71 | 12833 | 12242 | 67 |
| 50 (мото-час) | <u>7,05</u> | <u>0,35</u> | <u>52,46</u> | <u>39,92</u> | <u>0,22</u> |
| | 1572 | 78 | 11697 | 8902 | 49 |
| 100 (мото-ас) | <u>5,06</u> | <u>0,24</u> | <u>44,72</u> | <u>49,78</u> | <u>0,20</u> |
| | 1401 | 67 | 12383 | 13785 | 56 |

Однако в процессе работы содержание цинка постоянно увеличивается вследствие износа латунных поршневых колец, что сопровождается снижением износа двигателя в 1,4...1,7 раза, оцениваемого по содержанию железа в пробах.

Изменение содержания железа Y_{Fe} и цинка Y_{Zn} в масле выражается зависимостью: $Y_{Zn}=516\tau^{0,5943}$, $Y_{Fe}=894\tau^{-0,1265}$, где τ – продолжительность работы двигателя, мото-часы.

В пробах масла контрольного двигателя содержание цинка было намного больше (по скорости счета в 4 раза), тем не менее, износ оказался выше, чем у двигателя с латунными кольцами: $Y_{Fe}=1817\tau^{-0,163}$.

Результаты РСФА свежего и работавшего масла показали, что величина износа деталей ЦПГ, оцениваемая по относительному содержанию железа в пробах, зависит от содержания в них меди и цинка. Причем, с увеличением содержания цинка износ деталей ЦПГ уменьшается.

Дальнейшие многолетние эксплуатационные испытания двигателей СМД-14Н, СМД-18 подтверждают эффективность и целесообразность создания условий ИП при трении деталей постановкой латунных поршневых колец.

Латунный водомасляный теплообменник в поддоне двигателя для создания условий избирательного переноса при трении

Эффективность современных смазочных материалов повышают введением в них комплекса присадок, улучшающих их эксплуатационные свойства: вязкостные, депрессорные, антиокислительные, антикоррозионные, противоизносные и противозадирные присадки, содержащие хлор, серу, фосфор, цинк и другие элементы. Особой эффективностью отличаются маслорастворимые медьсодержащие присадки к смазочным материалам, обеспечивающие создание условий ИП при трении деталей машин.

На первом этапе исследования и практического применения ИП (эффекта безызносности) применялись мелкодисперсные порошки цветных металлов (меди, свинца, олова, бронзы, бронзовой пудры).

Следует отметить при этом, что присадки и порошки в смазочных материалах, срабатываются или выпадают в осадок в процессе эксплуатации машин, концентрация их становится ниже оптимальной, и эксплуатационные свойства масел и смазок снижаются. В связи с этим через некоторое время работы машин требуется добавление необходимых присадок или замена смазочных материалов.

Известны другие методы создания условий ИП в сопряжениях деталей, например нанесением на поверхность детали слоя латуни или меди в процессе фрикционной обработки (ФАБО). Возможна также установка в деталь вставок из цветных металлов (в поршневые кольца мощных судовых и стационарных двигателей) или замена одного чугунного поршневого кольца на поршне латунным кольцом. В этом случае латунь или медь вставки переносится на сопрягаемые трущиеся поверхности деталей ЦПГ (гильз цилиндров и поршневых колец), а продукты износа латунного кольца растворяются в моторном масле, в результате чего повышается концентрация меди и цинка в масле.

Содержание меди, а также цинка в масле можно увеличить электролитическим анодным растворением специальных дополнительных деталей из цветных металлов, устанавливаемых в системе смазки. Элементы этих металлов с маслом поступают в зону контакта микронеровностей деталей в сопряжении и выделяются в виде медной пленки на поверхности трения. Такой процесс растворения меди и создания медной пленки протекает в домашних холодильниках, в которых ионы меди трубок охладителя переносятся маслофреоновой жидкостью в зону трения стальных деталей компрессора, что обеспечивает длительную и безотказную работу холодильника в течение 30–40 и более лет.

В двигателях внутреннего сгорания условия ИП и необходимую концентрацию меди и цинка можно поддерживать с помощью водомасляного теплообменника (ВМТ), расположенного в масляном поддоне и включенного в систему охлаждения (рис. 3.19).

Известно, что такие жидкостно-масляные радиаторы (теплообменники) значительно повышают эффективность системы смазки, особенно в зимний период эксплуатации при температуре окружающей среды минус 40 °С и ниже, когда пуск двигателя автомобиля затруднен вследствие повышения вязкости и застывания смазочных материалов.

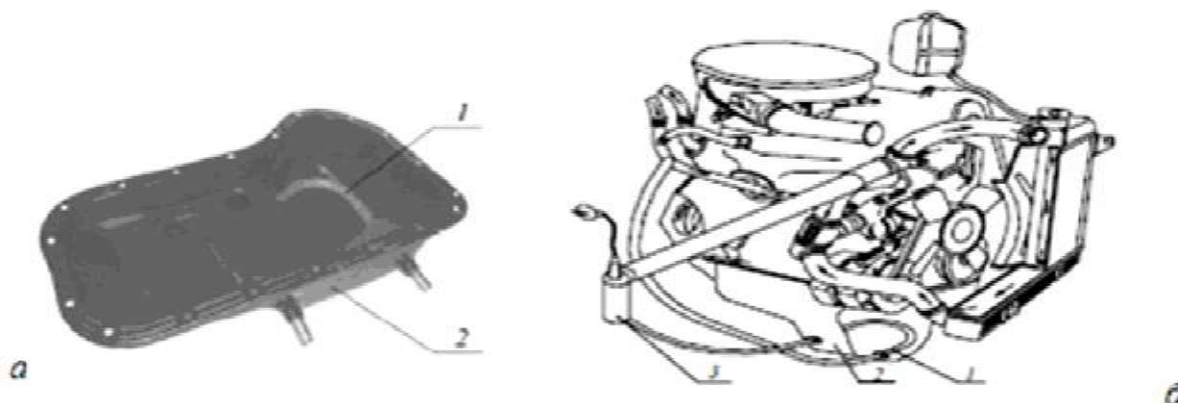


Рис. 3.19. Масляный поддон (2) с латунным водомасляным теплообменником (1) (а) и схема включения его в систему охлаждения двигателя ВАЗ-2103 (б), 3 – электрический нагревательный элемент (ТЭН)

Теплообменник, включенный постоянно в систему охлаждения, выполняет не только предпусковой разогрев, но и сокращает продолжительность прогрева масла после пуска, а также способствует поддержанию оптимальной рабочей температуры масла в процессе эксплуатации двигателя: подогревает масло зимой в условиях низких температур и охлаждает летом.

Температура масла в процессе эксплуатации двигателя отличается от температуры воды всего на 2...3 °С, тогда как с воздушно-масляным радиатором эта разница достигает 10...30 °С.

Испытания двигателя СМД-14Б трактора ТДТ-55А с водомасляным теплообменником со стальными трубками показали уменьшение износа деталей двигателя на 20...25 %, что объясняется разогревом и снижением вязкости моторного масла перед пуском, а также оптимальной его температурой в процессе работы двигателя (скорость изнашивания деталей определяли эмиссионным спектральным анализом проб работавшего масла).

Эффективность ВМТ увеличивается, если его изготовить из трубок из цветного металла (латуни, меди). Наружная поверхность латунных трубок теплообменника (или изготовленных из меди и других медь-цинк содержащих материалов) и расположенных в масляном поддоне двигателя, постоянно омывается моторным маслом, а по трубкам ВМТ постоянно циркулирует охлаждающая жидкость. Под действием температурного градиента между водой и маслом ионы меди и цинка непрерывно поступают как в моторное масло, так и в охлаждающую жидкость, и выделяются в точке контакта смазываемых трущихся поверхностей рабочих деталей двигателя.

Вследствие растворения латунных трубок в процессе работы двигателя происходит непрерывное поступление и поддержание на необходимом уровне концентрации противоизносных и противозадирных присадок меди и цинка в моторном масле.

С увеличением кислотности и коррозионной агрессивности моторного масла, повышением температуры и с появлением воды (конденсата) в системе смазки растворение трубок протекает более интенсивно.

В этих неблагоприятных условиях работы двигателя увеличивается поступление меди и цинка в воду и масло и, тем самым повышаются противоизносные и противозадирные свойства моторного масла. К тому же уменьшается (или даже предотвращается) коррозионный износ рабочих деталей двигателя, изготовленных из цветных металлов (подшипников коленчатого вала, медных и бронзовых втулок), и повышается износостойкость всех трущихся деталей и сопряжений двигателя, смазываемых маслом.

Латунный водомасляный теплообменник испытывали на двигателе ВАЗ-2101 в течение 4-х лет. Износ двигателя и содержание меди и цинка оценивали по результатам рентгеноспектрального анализа (РСФА) проб моторного масла, периодически отбираемых из системы смазки.

На рис. 3.20 показаны спектры моторного масла, которые обрабатывали по суммарным относительным интенсивностям линий излучения элементов.

Результаты обработки спектров показали незначительное изменение содержания меди в пробах масла, а также довольно заметное увеличение содержания железа, хрома и свинца в масле, что объясняется техническим состоянием двигателя, требующим капитального ремонта.

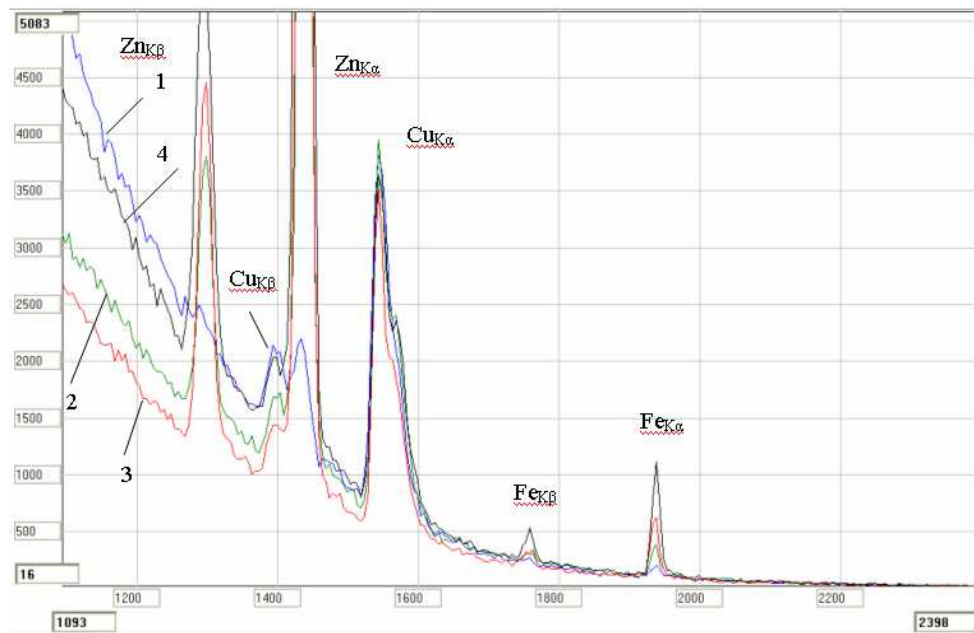


Рис. 3.20. Спектры проб моторного масла:

1 – свежее масло М8В1; 2 – «0» проба; 3 – проба, взятая при ТО-1; 4 – проба при эксплуатации двигателя на масле «ХАДО»

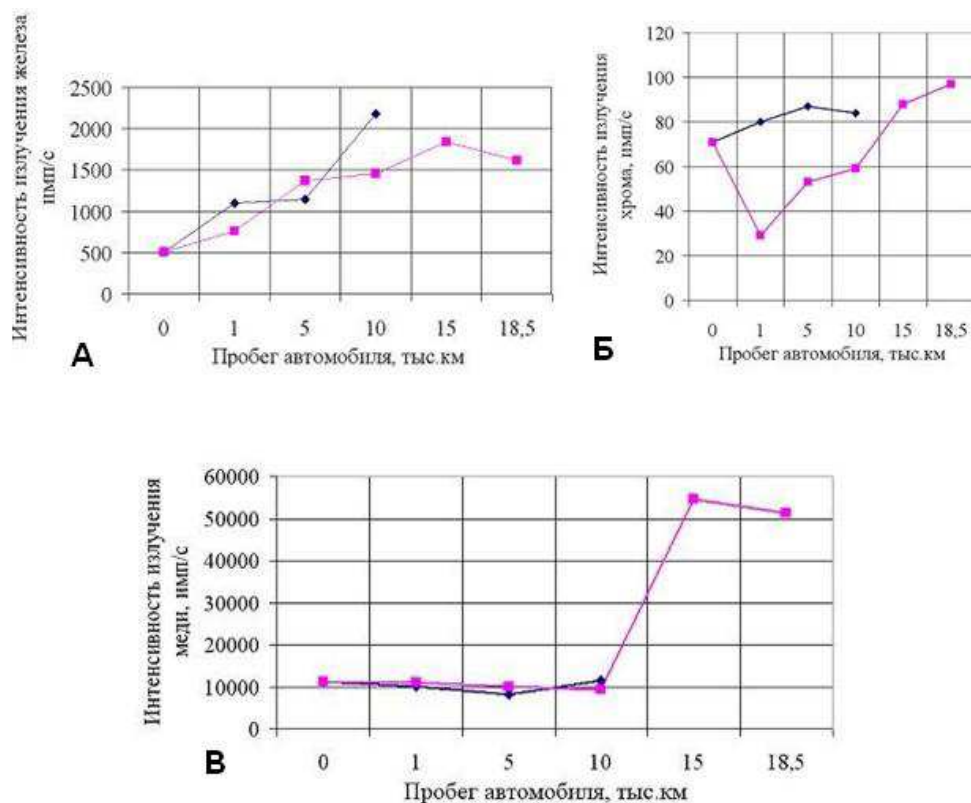


Рис. 3.21. Изменение содержания железа (а), хрома (б), и меди (в) в моторном масле в процессе эксплуатации автомобиля до и после включения водомасляного теплообменника в систему охлаждения:

—◆— до включения ВМТ; —■— после включения ВМТ

При этом отмечается весьма существенное возрастание содержания в масле цинка более чем в 10 раз, интенсивность излучения которого увеличивается от 2775 имп/с (19,1 %) в пробе свежего не работавшего масла М8В1 до 38267 имп/с (63,1 %) в работавшей.

При последующей работе двигателя на замененном масле содержание железа и свинца снижается, и особенно заметно возрастает содержание цинка (до 44276 имп/с (75,2 %)).

Отсутствие заметного роста концентрации меди можно объяснить тем, что медь, находящаяся в ряду напряжений правее водорода, быстро выделяется и прочно удерживается на поверхности стальных и чугунных деталей, состоящих в основном из железа, которое расположено в ряду напряжений левее водорода, и поэтому медь не накапливается в масле в значительном количестве.

В то же время при осмотре теплообменника при капитальном ремонте видно покраснение поверхности латунных трубок вследствие диффузии и выделения меди на поверхности или растворения цинка латуни.

Отмечаются значительные колебания содержания цинка в пробах работавшего масла, которые обусловлены качеством применяемых моторных масел (прежде всего содержанием цинковой присадки), условиями зимней и летней эксплуатации (температурным режимом), а также длительностью перерывов в работе двигателя.

Латунный водомасляный теплообменник, установленный в поддоне и включенный в систему охлаждения, испытывали в двигателе ВАЗ-2103 (рис. 3.19).

Автомобиль с таким двигателем эксплуатировали в условиях городского движения. На первом этапе (10 000 км пробега автомобиля) установленный в поддоне теплообменник не включали в систему охлаждения, из системы смазки отбирали пробы масла и определяли содержание продуктов износа.

На втором этапе, после замены масла теплообменник включен в систему охлаждения (подсоединены патрубки). Результаты исследования проб масла, периодически отбираемых из системы смазки, показали эффективность работы теплообменника (рис. 3.21, табл. 3.7)

Использование теплообменника повышает также экономичность работы двигателя, которую оценивали по продолжительности расхода топлива в поплавковой камере на минимальных оборотах холостого хода двигателя, (бензобак отключен).

Из приведенных данных видно, что при пробеге автомобиля до 10 тыс. км после включения ВМТ в систему охлаждения содержание железа и хрома в моторном масле снижается в 1,4 и в 1,78 раз соответственно.

Даже при увеличении пробега до 15,0...18,5 тыс. км. с включенным ВМТ содержание железа в масле меньше, чем при пробеге 10,0 тыс. км. без включения ВМТ (рис. 3.21, а, б).

Содержание меди и цинка в моторном масле при пробеге до 10,0 тыс. км. с включенным и не включенным ВМТ изменяется незначительно (рис. 3.21, в).

Однако увеличение пробега автомобиля до 15,0...18,5 тыс.км. характеризуется резким возрастанием содержания меди в работавшем масле (до 54701 и 51403 имп/с), что вызывается повышением кислотности моторного масла и коррозионным растворением латунных трубок ВМТ.

Увеличение содержания меди в масле при этом предотвращает интенсивное изнашивание трущихся деталей цилиндропоршневой группы двигателя и значительное возрастание содержания железа и хрома.

Таблица 3.8

Результаты измерений интенсивности скорости счета, имп./с, элементов в пробах масла по данным РСФА

| Элемент | Проба, пробег автомобиля, км | | | | | | |
|---------|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Без ВМТ, 10000 | Свежее | «0» проба, 1000 | 5000 | 10000 | 15000 | 18500 |
| Fe | 1909 | 507 | 1099 | 1147 | 2179 | – | – |
| | – | | 758 | 1375 | 1458 | 1838 | 1618 |
| Cr | 72 | 71 | 80 | 87 | 84 | – | – |
| | – | | 29 | 53 | 59 | 88 | 97 |
| Cu | 10708 | 11363 | 10226 | 8166 | 11590 | – | – |
| | – | – | 11103 | 10210 | 9378 | 54701 | 51403 |
| Zn | 38839 | 35803 | 36626 | 28192 | 37594 | – | – |
| | – | – | 34851 | 36966 | 34137 | 34541 | 33800 |
| Mn | 111 | 73 | 103 | 108 | 56 | – | – |
| | – | – | 52 | 75 | 57 | 80 | 37 |
| Pb | – | – | – | – | 429 | – | – |
| | | | | | 463 | 652 | 359 |
| Mo | 351 | 4622 | 443 | 568 | 399 | – | – |
| | – | – | 528 | – | 354 | 344 | 395 |
| Σ | 51638 (4562) | 45248 (4818) | 48577 (4609) | 38035 (4035) | 51840 (4707) | – | – |
| | – | – | 47321 (4806) | 49247 (4526) | 45515 (4358) | 91905 (4259) | 87314 (4234) |

Примечание: Σ – суммарная интенсивность излучения всех элементов в пробе, в скобках – величина фона в начале спектра. Теплообменник не включен (числитель), ВМТ включен (знаменатель)

Таким образом, установленный в масляном поддоне водомасляный теплообменник с латунными трубками не только улучшает температурные

условия пуска и работы двигателя, но и способствует поддержанию на оптимальном уровне медь-цинк содержащих противоизносных и противозадирных присадок. При этом наблюдается процесс самоорганизации условий ИП элементов при трении деталей.

3.3 Реализация безыносного трения при металлообработке

Работа выполнена при участии преподавателя физики средней общеобразовательной школы №1 Чихачевой Н.Ю., г. Покров, Россия

3.3.1. Совершенствование методов комбинированной обработки инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности на основе применения металлолакирующих смазок

Процессы обработки металлов резанием сопровождаются, как известно, трением между передней поверхностью режущего инструмента и опорной поверхностью стружки, а также задней поверхностью инструмента и поверхностью резания.

Трение в процессах механической обработки оказывает большое влияние на износостойкость инструмента.

Существуют различные методы повышения износостойкости инструментов: совершенствование геометрических параметров режущей части, оптимизация применяемых режимов резания, использование различных смазочно-охлаждающих средств и т.д.

Смазочно-охлаждающие средства, применяемые для уменьшения трения и изнашивания инструмента, разделяют на жидкие, газообразные и твердые. В современном машиностроении в подавляющем большинстве применяют жидкие смазочно-охлаждающие средства. Из твердых смазочно-охлаждающих средств находят применение дисульфид молибдена и графит.

Природа трения и изнашивания двух находящихся во фрикционном контакте тел (в данном случае пара инструмент – заготовка) объясняется закономерностями молекулярно-механической теории трения. Трение в процессе резания имеет ряд специфических особенностей, характерных только для механической обработки металлов резанием: наличие высоких температур на контактных площадках инструмента и заготовки; огромные давления, сопровождающие процесс резания; соприкосновение контактных площадок на поверхностях инструмента ювенильными металлическими поверхностями.

Одним из путей снижения износа инструмента в процессе резания является создание в зоне контакта пары инструмент – заготовка условий для проявления эффекта ИП, выражающегося в образовании на рабочих поверхностях тонкой пленки меди, имеющей значительную механическую прочность на сжатие и низкое сопротивление тангенциальному сдвигу. Такая твердая смазывающая пленка может быть получена в результате

хемосорбционного взаимодействия некоторых медьсодержащих химических веществ, введенных в зону контакта, с поверхностями трения. Если во время работы инструмента в зону контакта его с заготовкой подавать компоненты, из которых образуется такая хемосорбционная пленка, то она будет сохраняться на рабочих поверхностях инструмента непрерывно в течение всего процесса резания. Наличие пленки снижает коэффициент трения за счет уменьшения времени непосредственного контакта поверхностей инструмента и заготовки, снижает температуру резания и, следовательно, уменьшает износ инструмента.

Известно, что в условиях работы режущего инструмента с использованием смазочно-охлаждающих жидкостей проникновение этой жидкости на контактные площадки осуществляется по капиллярам, образующимся при "островном" контакте опорной поверхности стружки и поверхности резания с рабочими поверхностями инструмента. Кроме того, этому проникновению способствуют колебания инструмента и обрабатываемой детали, имеющие место в процессе резания и приводящие к систематическим разрывам контакта. Однако возникающие капилляры имеют очень незначительные размеры сечений. Поэтому ввод на контактные площадки медьсодержащих соединений в виде даже высокодисперсных частиц весьма затруднен. Наиболее целесообразна подача медьсодержащего соединения в зону резания в виде раствора в жидкой среде, обладающей также поверхностно-активными и антикоррозионными свойствами.

Как свидетельствует современная научная и промышленная статистика, актуальной традиционной проблемой существующих, а также инновационных методов механической обработки деформированием и резанием является проблема управления контактными процессами, важнейший из которых трение. С другой стороны, как показывает системный триботехнический анализ технологических объектов – целенаправленный синтез перспективных направлений кардинальной реорганизации (уменьшения), а по возможности и самоорганизации контактного трения возможен только на основе новых физических принципов. Наиболее значимыми принципами такого уровня в настоящее время являются регуляризация микрогеометрии воздействующей поверхности обрабатываемых инструментов и применение металлоплакирующих технологических смазок, реализующих фундаментальное научное открытие – эффект безызносности.

В работах А.В. Щедрина рассмотрено влияние свойств традиционных технологических смазок на характеристики метода комбинированного волочения инструментом с регулярной микрогеометрией воздействующей поверхности. Как показывает системный анализ методов обработки, применение фундаментальных физических эффектов, к которым относится эффект безызносности, позволяет целенаправленно создавать принципиально новые, или кардинально совершенствовать существующие технологии. Для проверки данного решения были проведены экспериментальные исследования влияния концентрации МСК «Валена» на характеристики метода

комбинированного волочения инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности.

В качестве экспериментальных образцов-заготовок использовались цилиндрические штоки из углеродистой стали марки Сталь 3 (твердость по Бринеллю 1430 МПа) номинальной длиной 150 мм. Образцы предварительно обрабатывались шлифованием с точностью до 0,02 мм и шероховатостью поверхности $R_{az}=0,423...0,665$ мкм.

В качестве обрабатывающего инструмента использовалась деформирующая фильера из стали марки 9ХС (60 HRC) с регулярной микрогеометрией поверхности. Диаметр фильеры по калибрующей ленточке – 20,02 мм, угол рабочего и обратного конусов – 5° , ширина калибрующей ленточки – 5 мм. Регулярный микрорельеф рабочей поверхности фильеры представлял собой однозаходные винтовые канавки радиусом 1,5 мм, шагом 0,5 мм, и глубиной на участке калибрующей ленточки 6,5 мкм.

В качестве технологической смазки применялось минеральное масло марки «И-40», в которое добавлялась МСК «Валена». Концентрация присадки по объему K составляла 25, 10, 5 и 0 % соответственно. Скорость волочения – около 1 м/мин, номинальный натяг деформирования i_n варьировался в диапазоне до 0,5 мм через 0,1 мм.

На рис. 3.28 представлена зависимость удельного и процентного уменьшения удельного усилий волочения образцов-заготовок из стали марки Сталь 3 от фактического натяга деформирования i_f и концентрации МСК «Валена».

Как следует из анализа зависимости (см. рис. 3.22, а) в первом приближении металлоплакирующая присадка уменьшает силу обработки и при концентрации 10 и 25 % полностью исключает адгезионное наростообразование обрабатываемого материала. Наибольшая адгезия наблюдалась при отсутствии присадки в области $i_n > 0,4$ мм. При $K=5\%$ адгезия обрабатываемого материала носила весьма локальный характер и возникала также при предельной деформации.

Аналитически графическую зависимость, показанную на рис. 3.22,б можно представить в виде следующей системы линейных уравнений, Н/мм:

$$\begin{cases} q_D(K=0) = 57,482 + 674,775 \cdot i_\phi; \\ q_D(K=5) = 76,845 + 531,855 \cdot i_\phi; \\ q_D(K=10) = 42,777 + 502,398 \cdot i_\phi; \\ q_D(K=25) = 71,25 + 483,341 \cdot i_\phi. \end{cases} \quad (1)$$

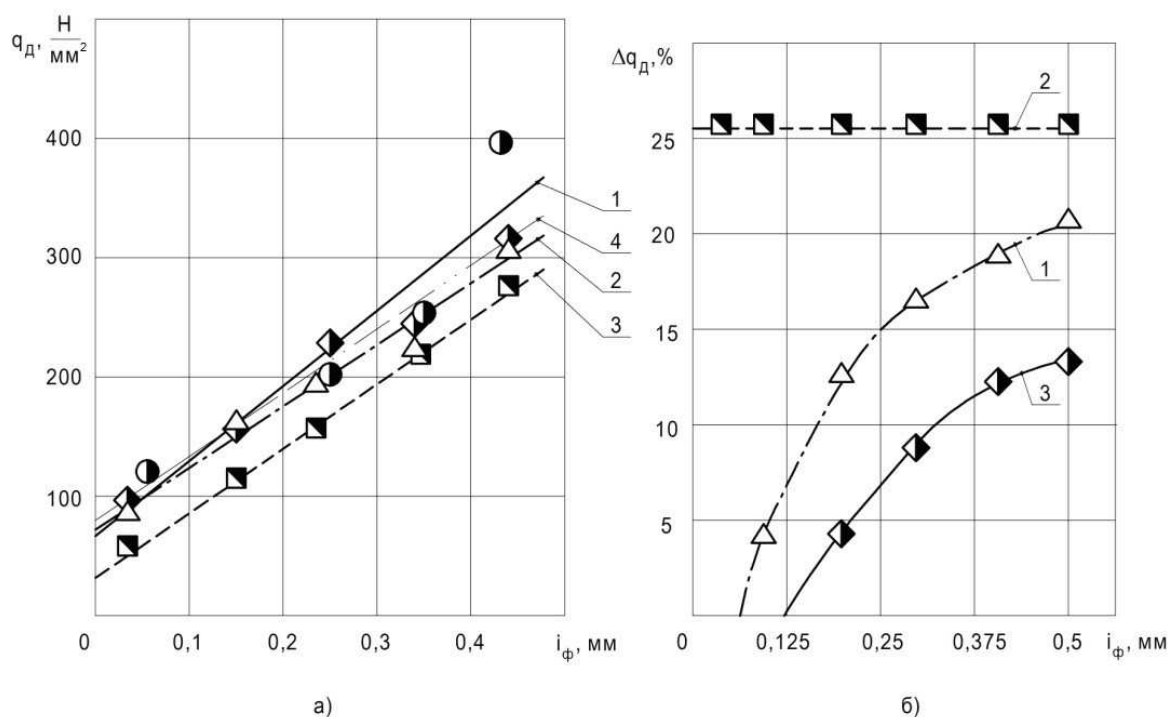


Рис. 3.22. Зависимость удельного (а) и процентного уменьшения удельного (б) усилия волочения от фактического натяга деформирования и концентрации МСК «Валена»:

а) 1 – $K = 0\%$; 2 – $K = 25\%$; 3 – $K = 10\%$; 4 – $K = 5\%$; б) 1 – $K = 25\%$; 2 – $K = 10\%$; 3 – $K = 5\%$

Из анализа зависимости (рис. 3.22, б) следует, что максимальный динамический эффект наблюдается при концентрации $K=10\%$. Причем уменьшение усилия обработки более чем на 25 % стабильно сохраняется во всем диапазоне изменения натяга деформирования. Меньшие динамические эффекты наблюдались при $K=5\%$ и $K=25\%$. Однако в отличие от обработки при $K=10\%$, обработка при вышеприведенных концентрациях присадки характеризуется соответствующим увеличением динамического эффекта при возрастании степени деформации.

Приравнивая параметры Δq_d в общем виде при $K=10\%$ и при $K=25\%$ получим, что при $i_\phi > 1,5\text{ мм}$ наиболее эффективна концентрация присадки $K=25\%$, так как при ней на рабочей поверхности фильеры образовывался наибольший по толщине слой меди.

Силовые зависимости (рис. 3.22) хорошо подтверждаются зависимостью коэффициента уточнения по параметру шероховатости поверхности (рис. 3.23):

$$K_y(Ra) = Ra_3 / Ra_d, \quad (2)$$

где Ra_3 и Ra_d – параметры шероховатости поверхности образцов до и после волочения, или условно образцов-заготовок и образцов-деталей.

Наличие адгезионного наростообразования при $K=0\%$ и $K=5\%$ приводит к ухудшению качества обработки и уменьшению $K_y(Ra)$. Усреднив значения $K_y(Ra)$ при каждой концентрации МСК «Валена» в диапазоне изменения натяга деформирования получим зависимость среднего коэффициента уточнения по параметру шероховатости от концентрации (рис. 3.24).

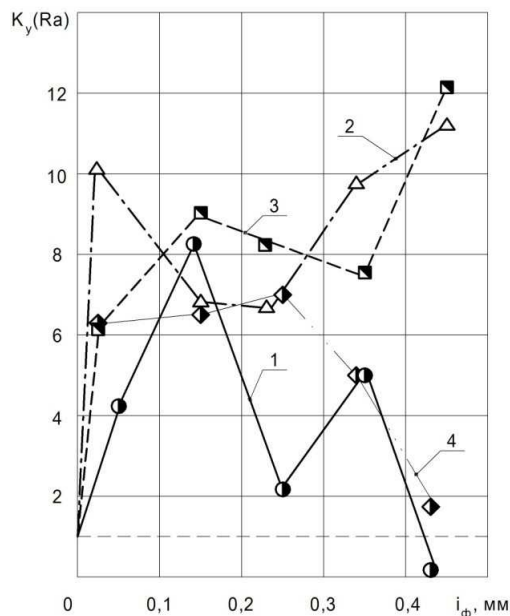


Рис. 3.23. Зависимость коэффициента уточнения по параметру шероховатости поверхности образцов-деталей из углеродистой стали марки Сталь 3 от фактического натяга деформирования и концентрации МСК «Валена»:

1 – $K = 0\%$; 2 – $K = 25\%$; 3 – $K = 10\%$;
4 – $K = 5\%$

Анализ этой зависимости показывает, что с увеличением концентрации металлоплакирующей присадки качество обработки по шероховатости поверхности увеличивается более чем в 2 раза.

После построения характерных профилей образцов-деталей, показанных на рис. 3.25, было установлено, что размерная точность (параметр ΔD_d) определяется в большей степени геометрической точностью в продольном, а не в поперечном сечении (овальностью).

В свою очередь, отклонение профиля в продольном сечении зависит от деформационных краевых эффектов в начале (Н.О) и в конце (К.О) обработки, которые соответственно проявляются в виде фаски смятия переднего торца образца-заготовки и в виде упругого волнообразного восстановления его заднего торца.

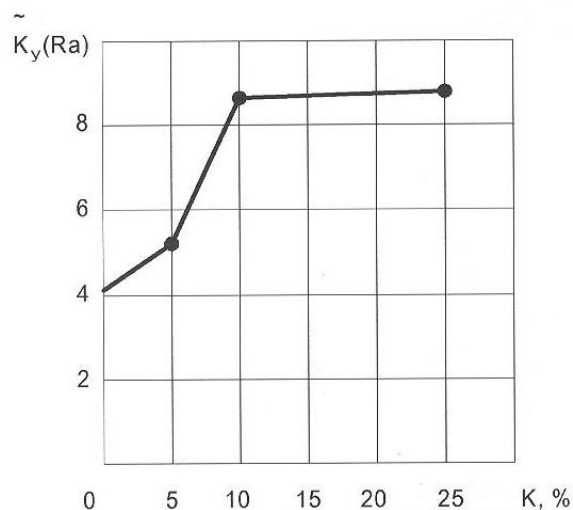


Рис. 3.24. Зависимость среднего коэффициента уточнения по параметру шероховатости поверхности от концентрации МСК «Валена»



Рис. 3.25. Характерные профили образцов-заготовок из углеродистой стали марки Сталь 3 при $i_{\phi} \approx 0,25$ мм

Как следует из анализа зависимости, представленной на рис. 3.26, с увеличением степени деформации размерная точность ухудшается вследствие роста краевых деформационных эффектов.

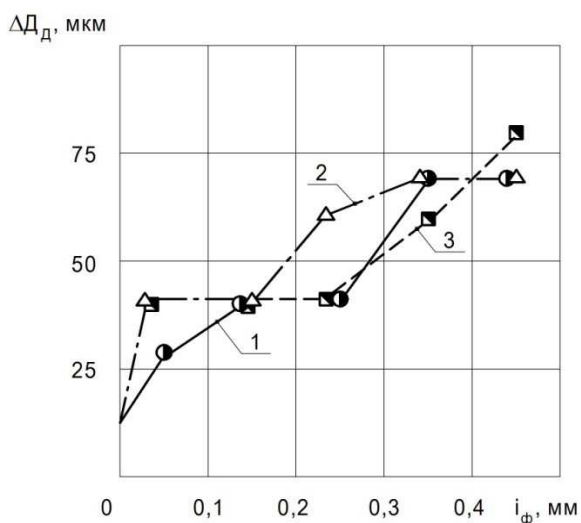


Рис. 3.26. Зависимость поля рассеяния диаметра образцов-деталей из углеродистой стали марки Сталь 3 от фактического натяга деформирования и концентрации МСК «Валена»:
 1 – $K = 0 \%$; 2 – $K = 25 \%$; 3 – $K = 10 \%$

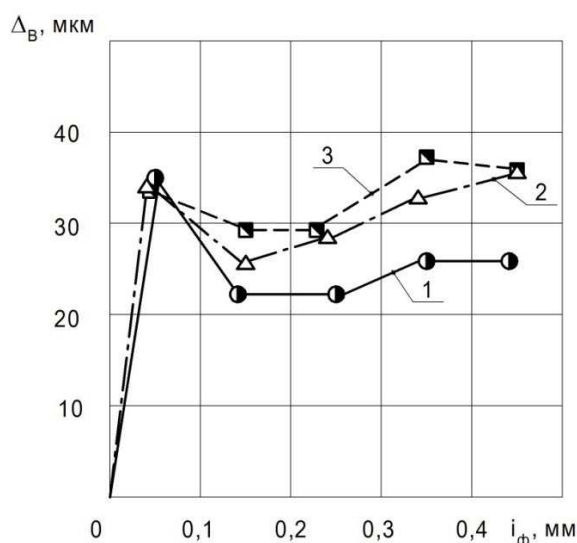


Рис. 3.27. Зависимость величины упругого восстановления поверхности образцов-деталей из углеродистой стали марки Сталь 3 от фактического натяга деформирования и концентрации МСК «Валена»:
 1 – $K = 0 \%$; 2 – $K = 25 \%$; 3 – $K = 10 \%$

Используя характерные профили образцов-деталей, определяли их средний диаметр, который затем сравнивали с диаметром рабочего канала фильеры, таким образом, оценивали остаточную деформацию поверхности, которая выражалась величиной её упругого восстановления Δ_b (рис. 3.27).

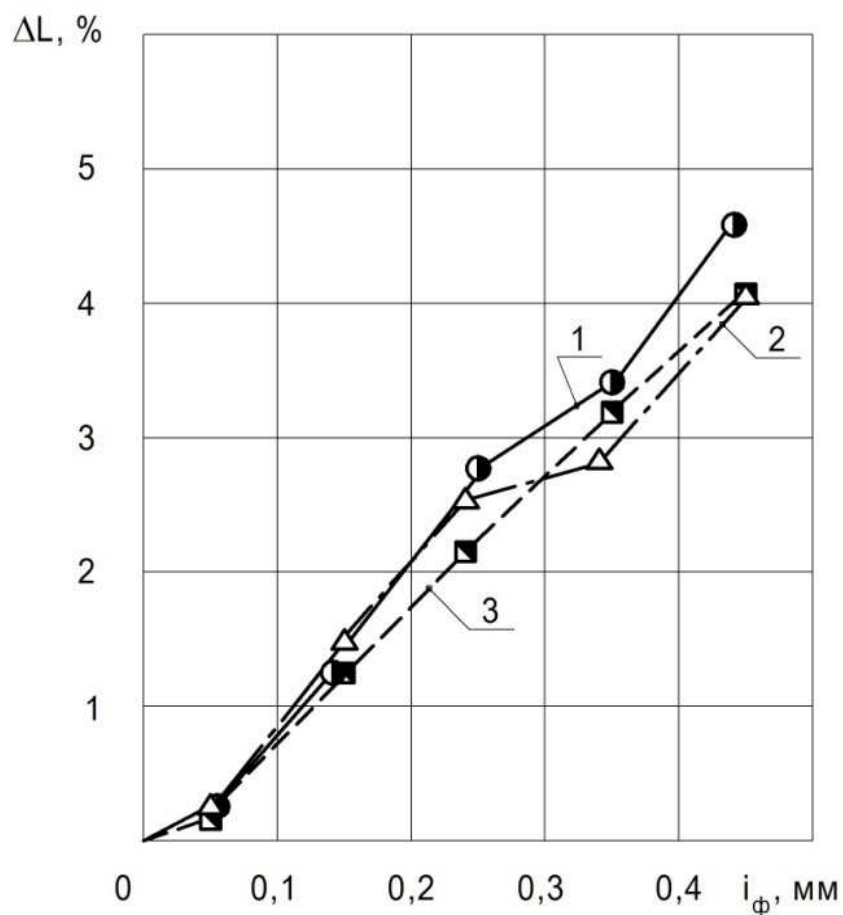


Рис. 3.28. Зависимость процентного удлинения образцов-деталей из углеродистой стали марки Сталь 3 от фактического натяга деформирования и концентрации МСК «Валена» :

1 – $K = 0\%$; 2 – $K = 25\%$; 3 – $K = 10\%$

Усредним зависимости (рис. 3.26-3.28), представленные в табл. 3.9 по аналогии с зависимостью, показанной на рис. 3.24 .

Таблица 3.9 Усредненные значения

| K , % | 0 | 5 | 10 | 25 |
|----------------------------|--------|-------|-------|--------|
| $\Delta \tilde{D}_d$, мкм | 50 | 52 | 52 | 56 |
| $\tilde{\Delta}_B$, мкм | 22,439 | 30,6 | 33,4 | 32,55 |
| $\tilde{\Delta L}$, % | 2,461 | 2,505 | 2,168 | 2,1836 |
| \tilde{K}_y (Ra) | 4,038 | 5,2 | 8,58 | 8,9 |

По аналогии также можно сделать анализ производительности обработки в виде увеличения i_ϕ при одинаковом усилии волочения. Для этого введём величину относительного процентного изменения натяга деформирования:

$$\Delta i_{\phi} = \frac{i_{\phi}(K \neq 0\%) - i_{\phi}(K = 0\%)}{i_{\phi}(K = 0\%)} \cdot 100\%; \quad (3)$$

где $i_{\phi}(K=0\%)$ и $i_{\phi}(K \neq 0\%)$ – натяги деформирования при равном усилии обработки, а также при отсутствии и наличии МСК «Валена» соответственно.

Зависимость параметра i_{ϕ} от удельного усилия волочения представлена на рис. 3.29. При этом шкала натяга деформирования i_{ϕ} при $K = 0\%$ введена для наглядности. Анализ зависимости показывает о существенном увеличении производительности обработки за счет реализации эффекта безызносности.

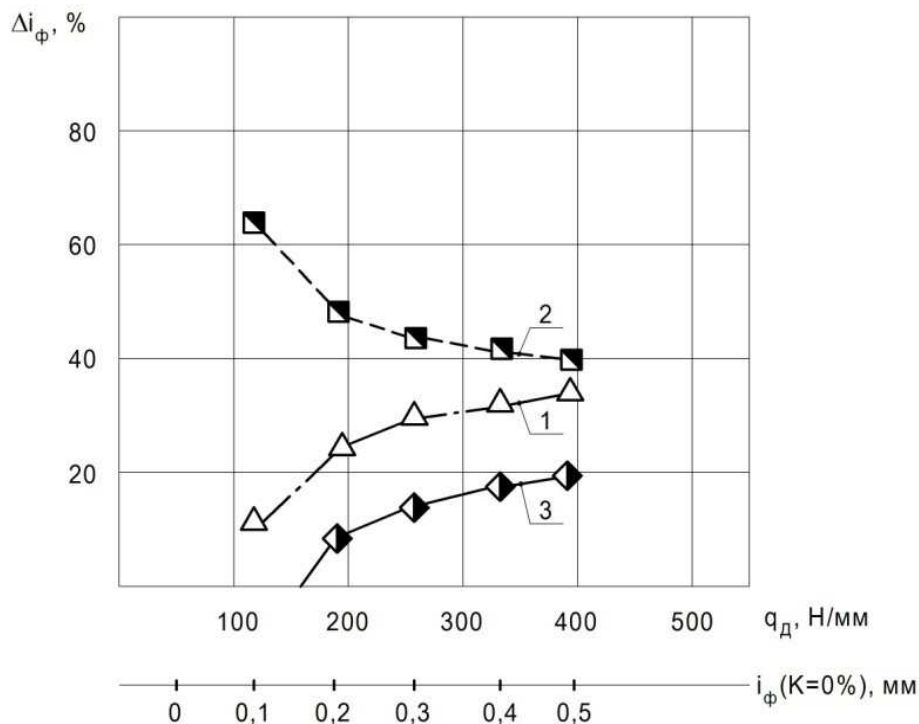


Рис. 3.29. Зависимость относительного процентного изменения натяга деформирования от удельного усилия волочения и концентрации МСК «Валена»:

1 – $K = 25\%$; 2 – $K = 10\%$; 3 – $K = 5\%$

Анализ результатов табл. 3.9 и зависимости, представленные на рис. 3.30–3.35, ещё раз дополнительно подтверждают существенное влияние контактных процессов на технико-экономические показатели методов обработки, включая волочение (редуцирование).

Фотографии деформирующей фильеры с регулярной микрогеометрией поверхности после обработки партии заготовок с применением МСК «Валена», а также цилиндрические штоки представлены на рис. 3.30 и 3.31 соответственно.



Рис. 3.30. Внешний вид деформирующей фильеры с РМР после обработки партии образцов-заготовок из стали марки Сталь 3 с МСК «Валена» (K=25%)



Рис. 3.31. Внешний вид деталей из углеродистой стали марки Сталь 3 после обработки волочением с применением МСК «Валена»

Как видно по фотографиям, фильера (преимущественно её рабочий канал) и цилиндрические штоки покрыты слоем сервовитной медной плёнки, имеющей соответствующий градиент цвета.

Таким образом, выполненные исследования расширяют информационную базу для системного параметрического синтеза принципиально новых методов комбинированной деформирующе-режущей обработки.

В дополнение к полученным результатам по комбинированному волочению с применением металлоплакирующих смазок, реализующих фундаментальный физический эффект безызносности, проведены аналогичные исследования метода комбинированного прошивания отверстий инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности.

В качестве экспериментальных образцов-заготовок использовались втулки из латуни марки ЛС59, наружным диаметром 39 мм и высотой 40 мм (твёрдость по Бринеллю 1550 МПа). Предварительная обработка отверстий образцов-заготовок - растачивание с параметром шероховатости поверхности $R_{az} < 1$ мкм.

В качестве экспериментального инструмента использовалась однозубая сборная прошивка с деформирующими элементами из быстрорежущей стали марки Р6М5. Диаметры деформирующих элементов по калибрующей ленточке 20,13 и 20,2 мм, угол рабочего и обратного конусов – 5° , ширина калибрующей ленточки – 7 мм. Рабочие поверхности деформирующих элементов имеют регулярный микрорельеф в виде однозаходных винтовых канавок радиусом 1,5 мм, шагом 0,5 мм и глубиной на участке калибрующей ленточки 8 мкм.

Обработка выполнялась на испытательной машине со скоростью прошивания 0,05 м/мин. В качестве технологической смазки использовалось индустриальное масло марки «И-40» с добавкой МСК «Валена». Концентрация присадки К по объёму составляла 0, 10 и 20% соответственно.

На рис. 3.32 представлена зависимость удельной силы прошивания от фактического натяга деформирования и концентрации МСК «Валена». Как следует из анализа данной зависимости, МСК «Валена» уменьшает усилие прошивания, даже при обработке медных сплавов.

Аналитически, графические зависимости можно представить в виде следующей системы линейных выражений, Н/мм:

$$\begin{cases} q_{Д}(K = 0) = 176,97 + 569,53 \cdot i_{\Phi}; \\ q_{Д}(K = 10) = 162,56 + 341,54 \cdot i_{\Phi}; \\ q_{Д}(K = 20) = 66,05 + 802,1 \cdot i_{\Phi}. \end{cases} \quad (4)$$

Динамический эффект, как и при волочении штоков, оценивали величиной относительного процентного уменьшения усилия обработки.

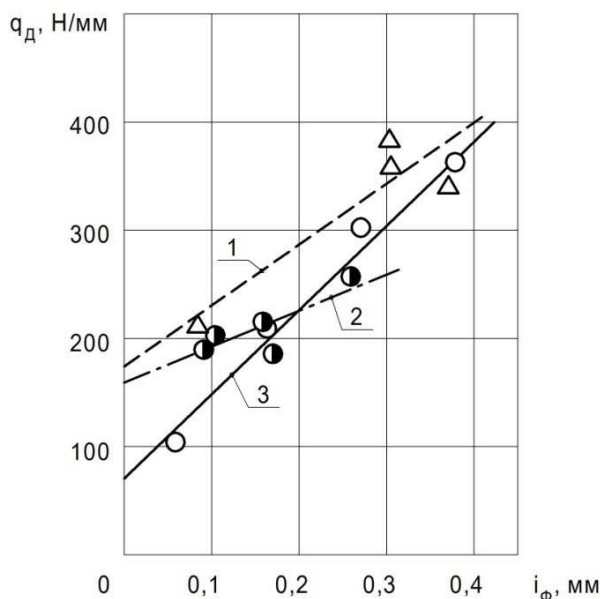


Рис. 3.32. Зависимость удельного усилия прошивания от фактического натяга деформирования и концентрации МСК «Валена»:

1 – К = 0 %; 2 – К = 10 %; 3 – К = 20 %

На рис. 3.33, а приведена зависимость параметра $\Delta q_{Д}$ от натяга деформирования и концентрации присадки, из анализа которой можно сделать следующие выводы: при применении металлоплакирующих смазок возможно существенное уменьшение силы обработки; при фактическом натяге

деформирования $i_{\Phi} < 0,209$ мм обработку целесообразно вести с концентрацией присадки 20 %, а при $i_{\Phi} > 0,209$ мм оптимальная концентрация присадки 10 %; при $K=10\%$ по мере увеличения степени деформации i_{Φ} динамический эффект имеет тенденцию к своему росту.

Дополнительно, используя зависимость (рис. 3.32), можно проанализировать изменение производительности обработки в виде относительного процентного увеличения натяга деформирования.

На рис. 3.33, б приведена зависимость параметра Δi_{Φ} ($K \neq 0$ %) от натяга деформирования при концентрации $K = 0$ %, равного усилия обработки и концентрации МСК «Валена».

Анализ вышеуказанной зависимости показывает, что при концентрации $K=10$ % в диапазоне натягов деформирования $i_{\Phi} = 0,1 \dots 0,3$ мм производительность обработки может быть увеличена почти в 2 раза, что также является существенным результатом.

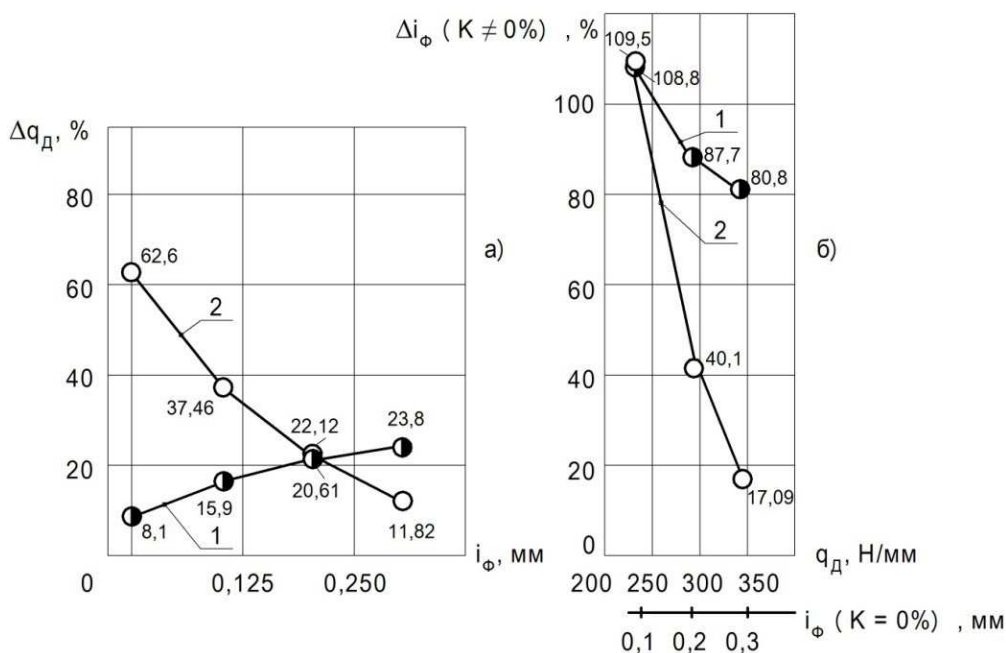


Рис. 3.33. Зависимости относительных процентных уменьшения удельного усилия обработки (а) и повышения производительности в виде увеличения степени деформации (б) от фактического натяга деформирования и концентрации МСК «Валена»:

1 – $K=10$ %; 2 – $K=20$ %

На рис. 3.34 представлена зависимость коэффициента уточнения по параметру шероховатости обработанных отверстий. Предварительный анализ данной зависимости также свидетельствует об эффективности МСК «Валена».

По аналогии с предыдущими исследованиями усредним значения $K_y(Ra)$ по соответствующей концентрации МСК «Валена» и диапазону натяга деформирования.

В результате получим следующее: при $K=0\%$ среднее значение коэффициента уточнения по параметру шероховатости $K_y(Ra) = 6,24$; при $K = 10\%$ $K_y(Ra) = 7,165$; при $K=20\%$ $K_y(Ra)=8,601$.

Таким образом, при применении МСК «Валена» - качество обработки по шероховатости поверхности может быть повышено в 1,37 раза, что также является существенным эффектом.

В результате измерения отверстия всех образцов-деталей в четырех диаметральных и трёх высотных сечениях по методике получена зависимость поля рассеяния диаметра от фактического натяга деформирования и концентрации МСК «Валена» (рис. 3.35). Анализ данной зависимости показывает, что при использовании металлоплакирующей присадки в области натягов деформирования до 0,1 мм может быть получен эффект по размерной точности.

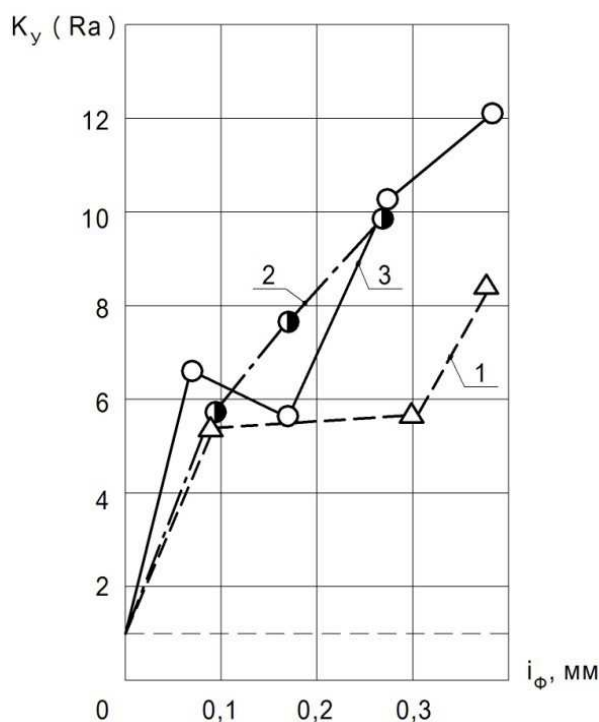


Рис. 3.34. Зависимость коэффициента уточнения по параметру шероховатости поверхности отверстия образцов-деталей от фактического натяга деформирования и концентрации МСК «Валена»:

1 – $K=0\%$; 2 – $K=10\%$; 3 – $K=20\%$

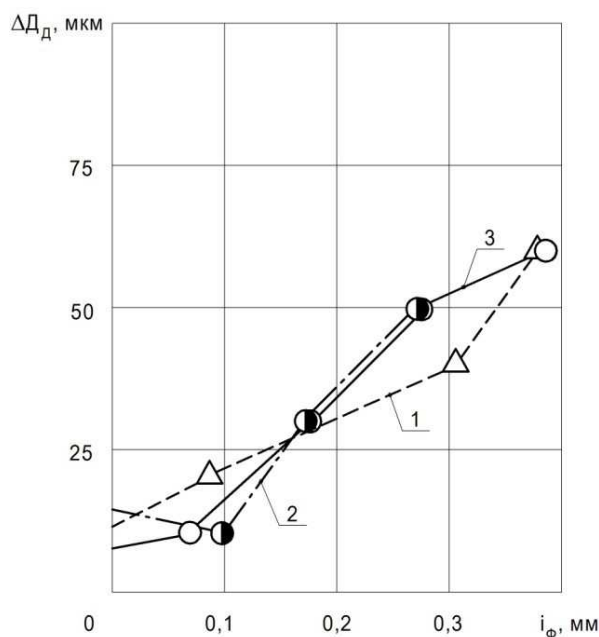


Рис. 3.35. Зависимость поля рассеяния диаметра отверстия образцов-деталей от фактического натяга деформирования и концентрации МСК «Валена»:
1 – $K=0\%$; 2 – $K=10\%$; 3 – $K=20\%$

Причем, как показывает анализ геометрической точности (рис. 3.36), наибольшее влияние на размерную точность получаемых отверстий оказывает отклонение профиля продольного сечения, а не овальность. Увеличение отклонения профиля продольного сечения получаемых отверстий при увеличении степени деформации i_Φ связано с действием на выходном торце образцов-заготовок реактивных сил трения с опорно-установочной поверхностью приспособления.

Реактивные силы на выходном торце (сечение III) прямо пропорциональны силе обработки (рис. 3.37) и соответственно увеличивают в этой зоне радиальную жёсткость заготовки. При этом входной торец (сечение I) обладает меньшей радиальной жёсткостью, что и приводит к образованию ярко выраженной конусности образующей получаемых отверстий.

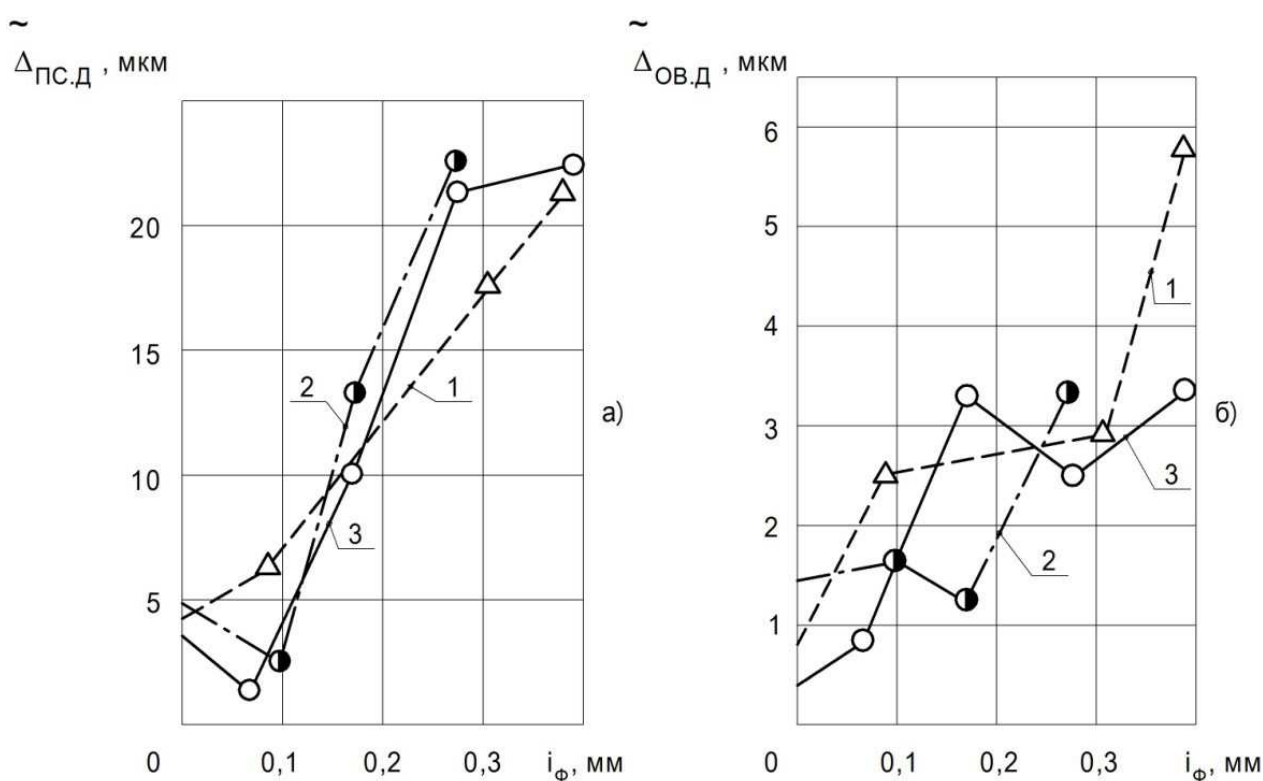


Рис. 3.36. Зависимость среднего отклонения профиля продольного сечения (а) и средней овальности (б) отверстия образцов-деталей от фактического натяга деформирования и концентрации МСК «Валена»:

1 – K=0 %; 2 – K=10 %; 3 – K=20 %

Увеличение овальности отверстия образцов-деталей с увеличением степени деформации i_Φ (рис. 3.36) частично связано с соответствующей несимметричностью очага деформации из-за винтового расположения выступов регулярного микрорельефа поверхности инструмента.

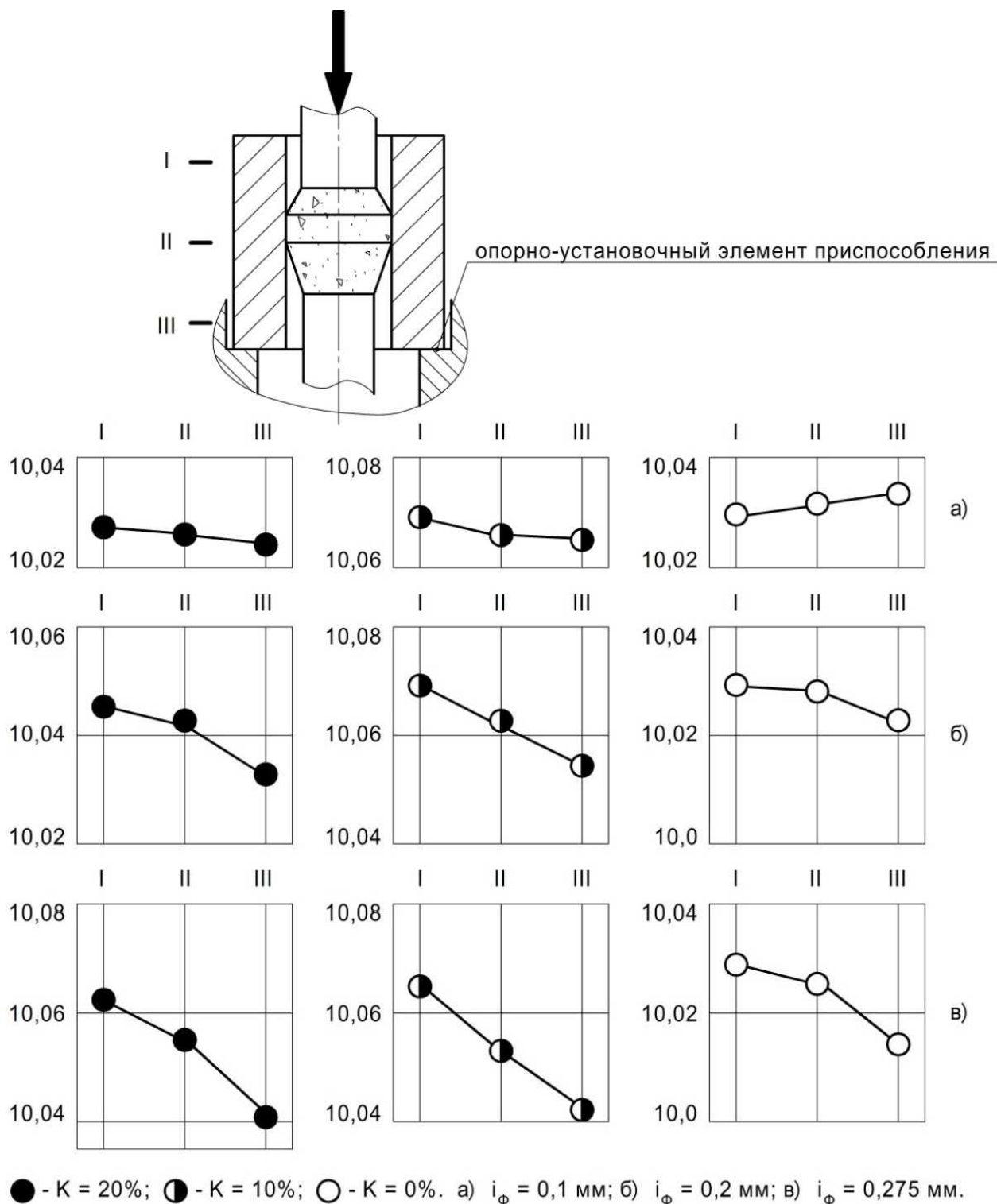


Рис. 3.37. Характерные продольные профили отверстий образцов-деталей в зависимости от фактического натяга деформирования и концентрации МСК «Валена»

Особый интерес в проведённом комплексе исследований занимает анализ остаточных деформаций образцов-деталей. На рис. 3.38 представлена зависимость диаметральной остаточной деформации отверстия образцов-деталей Дв от фактического натяга деформирования концентрации МСК «Валена».

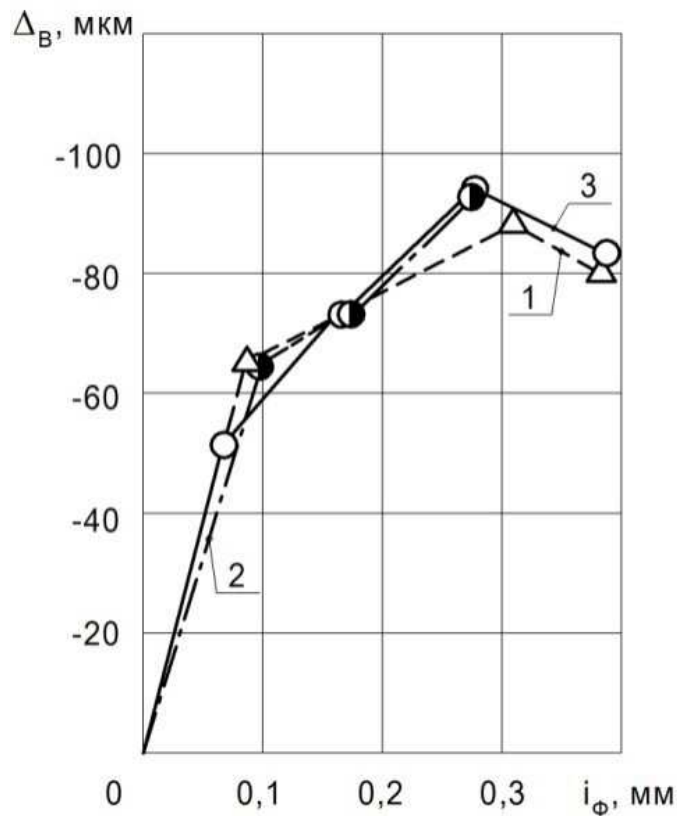


Рис. 3.38. Зависимость диаметральной остаточной деформации отверстия образцов-деталей от фактического натяга деформирования и концентрации МСК «Валена»:

1 – К=0 %; 2 – К=10 %; 3 – К=20 %

Анализ данной зависимости показывает: данная остаточная деформация имеет отрицательное значение, то есть диаметр получаемого отверстия меньше диаметра деформирующего элемента по калибрующей ленточке; при $i_\phi > 0,3$ мм наблюдается тенденция перехода остаточной деформации в положительную область, в которой диаметр отверстия больше диаметра инструмента. Причём при отсутствии присадки этот переход интенсифицируется.

Это связано с контактным взаимодействием обрабатываемой заготовки и деформирующего элемента и соответствующими величиной и знаком остаточных, в первую очередь, окружных (тангенциальных) напряжений.

На рис. 3.39 представлена зависимость осевой остаточной деформации образцов-деталей ΔL_d от фактического натяга деформирования и концентрации МСК «Валена», где L_3 и L_d – высота образца-заготовки и образца-детали соответственно.

Следует отметить, что осевая остаточная деформация формируется в виде краевого эффекта от вспучивания материала на входном торце заготовки при внедрении деформирующего элемента и в виде пластической волны на выходном торце заготовки в результате сдвиговых деформаций в поверхностном слое отверстия при прошивании.

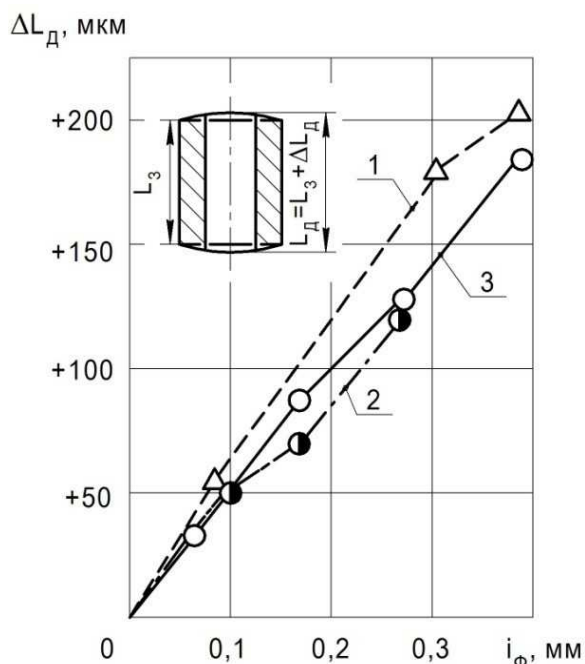


Рис. 3.39. Зависимость осевой остаточной деформации образцов-деталей от фактического натяга деформирования и концентрации МСК «Валена»:

1 – $K=0\%$; 2 – $K=10\%$; 3 – $K=20\%$

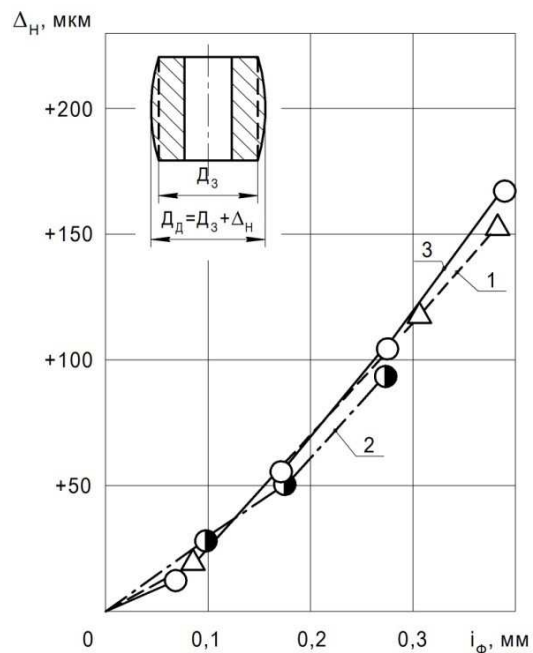


Рис. 3.40. Зависимость диаметральной остаточной деформации наружной поверхности образцов-деталей от фактического натяга деформирования и концентрации МСК «Валена»:

1 – $K=0\%$; 2 – $K=10\%$; 3 – $K=20\%$

Анализ зависимости показывает, что чем меньше сила обработки (рис.3.32), тем меньше осевая остаточная деформация, и наоборот.

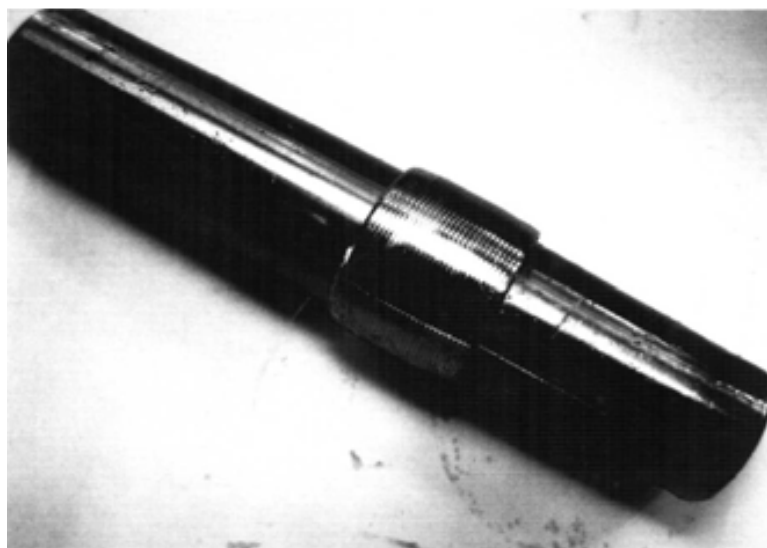


Рис. 3.41. Внешний вид деформирующего дорна с РМР после обработки партии образцов-заготовок из латуни марки ЛС59 с применением МСК «Валена»

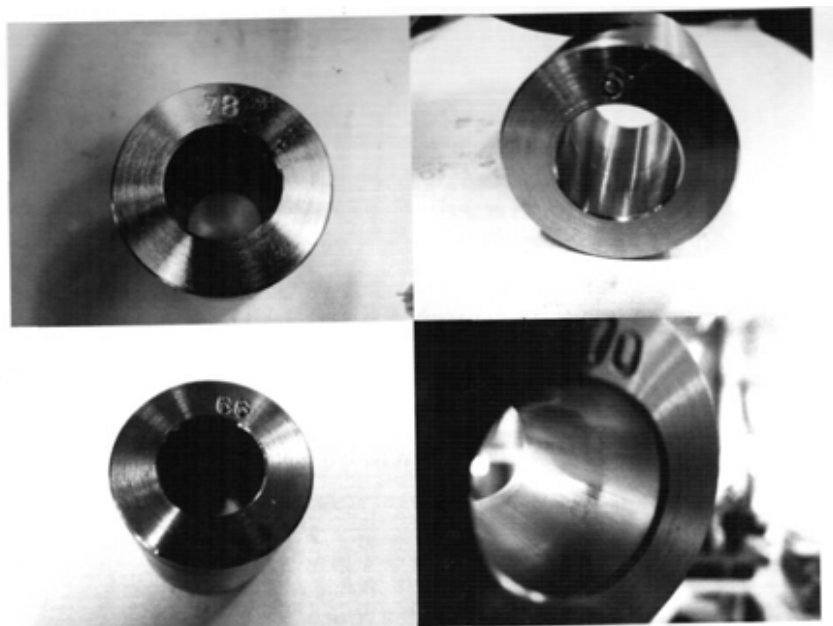


Рис. 3.42. Внешний вид деталей из латуни марки ЛС59 после обработки дорнованием (прошиванием) с применением МСК «Валена»

На рис. 3.40 представлена зависимость диаметральной остаточной деформации наружной поверхности экспериментальных образцов Δn , где D_z и D_d – наружный диаметр экспериментальных образцов до и после прошивания соответственно. Анализ этой зависимости также частично подтверждает вывод о минимизации остаточных деформаций образцов-деталей при применении металлоплакирующих смазок.

На рис. 3.41, 3.42 представлен деформирующий элемент (дорн- прошивка) с регулярным микрорельефом воздействующей поверхности и экспериментальные втулки после обработки с МСК «Валена».

Таким образом, полученные результаты еще раз убедительно подтверждают возможность кардинального совершенствования различных методов комбинированной обработки на основе реализации научного открытия – эффекта безызносности. Более подробная информация о возможностях технологической реализации эффекта безызносности содержится в работах [55-58], выполненных А.Ю. Козловым, А.О. Поляковым (ООО МЗ «ТОНАР»), М.А. Зининым, Е.С. Сергеевым, С.А. Гавриловым (ОАО «НПП «Респиратор») под научным руководством к.т.н. А.В. Щедрина в рамках выполняемых ими диссертационных работ на соискание ученой степени кандидата технических наук.

3.4 Безразборное восстановление изношенных машин

Сущность процесса. На основе эффекта безызносности возможно благодаря трению не только покрывать поверхности трущихся деталей тонкими слоями антифрикционных материалов с помощью рабочего инструмента, но и восстанавливать узлы трения машин без их разборки.

Необходимо напомнить, что эффект безызносности относится к самоорганизующимся явлениям неживой природы. При его реализации узел трения по конструкции и характеру работы напоминает сустав живого организма.

При эффекте безызносности в паре бронза – сталь самопроизвольно образующаяся металлическая пленка (меди, олова) с особыми свойствами значительно снижает коэффициент трения и износ деталей. В случае применения смазочной среды, содержащей оксиды, гидроксиды металлов, соли минеральных или органических кислот, а также комплексные соединения мягких металлов, при работе узла трения сталь – сталь или сталь-чугун на поверхностях в зоне непосредственного контакта образуется защитная (серфовитная) пленка из металла, вводимого в смазочную среду в виде указанных выше соединений. Благодаря особым свойствам этой пленки (высокой адсорбционной способности, пористости, низкому сопротивлению сдвигу) на ее поверхности образуется плотный хемосорбционный слой (серфинг-пленка), представляющий координационные соединения металла с поверхностно-активными веществами (ПАВ). Таким образом, образование металлической пленки и на ней серфинг-пленки на обеих поверхностях уменьшает зазор в узлах трения в ряде случаев до первоначального размера.

Высокая износостойкость восстановленного таким образом узла трения обусловлена рядом факторов, подробно описанных в ранее опубликованных работах (удержание в зоне контакта частиц износа электрическими силами, усиление действия эффекта Ребиндера, защита от водородного износа и др.).

Технология безразборного восстановления автомобильного двигателя. Технология состоит из трибологической обработки двигателя, диагностики (снятия технических показателей до и после обработки), а также гарантийного обслуживания двигателя автомобиля в течение года или 30 тыс. км пробега (В.Н. Крестьянников).

Диагностика. Предварительно водителю автомобиля задаются вопросы, касающиеся технического состояния автомобиля: как работает двигатель, каков расход топлива и масла, когда производилась замена масла, фильтров (топливного, масляного, воздушного), когда производился капитальный ремонт двигателя с заменой вкладышей, поршневых колец, расточкой цилиндров, шлифованием шеек коленчатого вала, менялись ли маслоъемные колпачки и др. вопросы.

1. *Проверка уровня масла и его подтекание.* Проверяется цвет масла, присутствие воды (прибором или визуально). Если обнаруживается вода в масле, выясняется причина ее наличия, а также устраняется подтекание масла.
2. *Запуск двигателя.* Прослушивается работа двигателя стетоскопом на предмет наличия посторонних стуков. Часто причиной плохого запуска

двигателя являются недостаточные зазоры (тепловые) клапанов.

3. *Замер СО.* Проверяется СО в выпускных газах на холостом ходу и при 2500...3000 мин-1. Для объективности замера нужно убедиться, что выпускной тракт не пропускает газы.
4. *Проверка свечей.* Вывертываются свечи и проверяется их состояние, а также соответствие их марки модели двигателя. Обращается внимание на цвет электродов и наличие твердой корочки нагара на электродах. Выясняется у водителя, когда менялись свечи и когда была их зачистка в последний раз. Складываются свечи в пронумерованные ячейки, соответствующие номерам цилиндров.
5. *Замер компрессии.* Производится замер компрессии (двигатель должен быть прогрет не ниже 60 °С). Компрессия по цилиндрам не должна отличаться более чем на 1 атм. для карбюраторных двигателей и 2 атм. для дизельных. Если в цилиндр попадает избыточное количество масла, то в этом цилиндре может быть как минимальная, так и максимальная компрессия. Минимальная компрессия возникает в результате закоксовывания поршневых колец из-за образования смолистых веществ (продуктов сгорания масла и неполного сгорания топлива). В этом случае свеча имеет большой нагар на электродах. Неполное сгорание топлива может возникнуть и вследствие неисправности свечи, неисправности в цепи высокого напряжения, негерметичности закрытия клапанов и др. Высокая компрессия возникает из-за наличия уплотняющей пленки избыточного масла в межкольцевом и цилиндровом зазоре. В этом случае свечи всегда имеют нагар на электродах. Избыточное попадание масла в цилиндры может происходить в результате выхода из строя маслосъемных колпачков клапанов; повышенного износа направляющих втулок клапанов или наличия в них трещин; деформирования головки блока из-за перегрева (часто встречается в дизелях); износа или закоксовывания маслосъемных поршневых колец; повышенного давления картерных газов. Очень низкая компрессия может быть в результате поломки колец и прогара поршней. Этот дефект может быть установлен замером компрессии с заливкой в цилиндр моторного масла 10...20 мл. Если при этом компрессия возрастает хотя бы на 2 атм., то можно считать, что этих дефектов нет. Кроме того, необходимо еще проверить герметичность закрытия клапанов. Для этого нужно установить поршень в ВМТ, включить скорость, установить ручной тормоз, опрессовать цилиндр воздухом $P = 2$ атм. и стетоскопом прослушать наличие шумов на выходе воздуха в карбюраторе (в воздушном коллекторе дизеля), в выхлопной трубе, радиаторе или расширительном бачке, маслоналивной горловине. По наличию шумов можно судить о больших неплотностях соответственно во впускном клапане, выпускном клапане, о пробое прокладки под головкой блока и неисправностях ЦПГ.
6. *Проверка состояния прерывателя-распределителя.* Проверяется наличие

нагара на контактах крышки и бегунке, нагар зачищается; замеряется и регулируется зазор между контактами прерывателя (для контактной системы зажигания), контакты зачищаются. При наличии высоковольтных пробоев или большого износа на контактах крышки и бегунка их необходимо заменить. При наличии люфта в подшипнике трамблер необходимо отремонтировать. При износе контактов прерывателя их также необходимо заменить.

7. *Очистка магистрали вентиляции картерных газов.*
8. *Проверка свечей зажигания.* Проверяются свечи зажигания после зачистки электродов и регулировки зазоров на стенде. В дизельных двигателях проверяются форсунки на соответствие давления впрыска и количества распыла на стенде. Проверяются на работоспособность свечи накаливания.
9. *Проверка и регулировка момента зажигания у бензиновых двигателей и угла опережения впрыска топлива у дизелей.* Проверяется и регулируется момент зажигания и угол опережения впрыска топлива при помощи стробоскопа.
10. *Регулировка холостого хода.* Производится регулировка холостого хода карбюратора, количество и качество смеси при помощи газоанализатора и тахометра. Проверяется, не забит ли в карбюраторе канал отбора картерных газов.

3.5 Разработка интеллектуальных материалов и на их основе универсальных узлов трения механизмов и машин

В настоящем разделе показана перспектива развития исследований по ИП (эффекту безызносности). Затронуты вопросы исследований японских и американских специалистов по новым конструкционным материалам [2,13,17,20,27].

Узел трения, работающий в режиме ИП, в некоторой степени напоминает узел трения сустава живого организма. При ИП материал одной детали отделен от материала сопряженной детали металлическим слоем – сервовитной пленкой. На ней находится серфинг- пленка (металлоорганическая пленка). Такое строение поверхностей трения аналогично строению поверхностей трения суставов живых организмов.

Природа выработала универсальный узел трения – один для человека, животного, птицы и рыбы. Здесь сопряженные поверхности костей покрыты хрящем, на котором имеется полимерная пленка, пропитанная синовиальной жидкостью. Работают в суставах одноименные материалы, причем мягкий по мягкому. Природа создала только одну «конструкцию» закрытого узла трения, используя один материал и одну смазку, сосредоточив внимание на надежности и универсальности узла. Одна поверхность не может быть агрессивной по отношению к другой поверхности.

При режиме трения в условиях ИП происходит то же самое. Следует отметить, что человечество при своем развитии и при совершенствовании научно технических разработок не раз использовало аналоги явлений, выработанных за миллионы лет природой. Проведя данный анализ, в России впервые были начаты работы по созданию узлов трения, которые по своему принципу напоминают суставы живых организмов. Тут вспоминаются знаменитые слова выдающегося австрийского физика Л. Больцмана, который говорил, что «процесс познания – есть отыскание аналогий». В последние 6–7 лет в материаловедении появился новый термин «интеллектуальные» материалы. Это ознаменовало новую фазу в конструировании материалов. Работы проводятся в Японии и Америке.

Как отмечается в зарубежной печати, к настоящему времени материалов, которые во всех отношениях можно было бы считать "интеллектуальными", не существует. Отмечается, что введение понятия "интеллектуальности" предопределяет развитие материаловедения на все последующее столетие и, возможно, на значительно более долгий период времени, поскольку выдвигает качественно новые задачи и соответственно требует принципиально новых методов их решения. В связи с этим дальнейшее развитие технологий и приобретение или сохранение научного и технического лидерства, как считают японские специалисты, возможно лишь при незамедлительном выделении всего комплекса исследований в этой области в качестве приоритетных.

Японские специалисты считают, что «интеллектуальные» материалы представляют собой логический результат исторического развития материалов в ряду конструкционный материал – композиционный материал – функциональный материал – «интеллектуальный материал». Важнейшим достоинством концепции является использование в качестве исходных точек ее развития аналогий между свойствами будущих материалов и функциями живого организма. Эти аналогии содержат в себе стимул для дальнейшего ее совершенствования, что позволило авторам провести экстраполяцию основных положений японской концепции и предложить в качестве заключительного этапа создание «интеллектуального» изделия, позволяющего обеспечить наиболее полную реализацию возможностей «интеллектуального» материала, и вслед за этим (или одновременно) создание искусственного «живого» организма.

Создание «интеллектуальных» материалов, как свидетельствуют публикации, заключается в теоретическом и экспериментальном изучении механизмов структурных преобразований в материалах, их связей с выражаемыми функциями и в последующем конструировании необходимых механизмов, а затем и самих материалов.

В качестве методов получения и контроля тонкой структуры материалов на данном этапе предполагается использовать существующие и достаточно отработанные технологии получения тонких пленок, эпитаксиальную

технологии, методы выборочного травления, различные виды электронной микроскопии, спектроскопические и дифракционные методы анализа и т.п.

Почти всегда появление новой терминологии характеризует следующий виток развития той области науки, в которой изменения достигли революционного пика. Этот процесс носит междисциплинарный характер, поэтому всегда существует вероятность «синонимии» о нежелательности появления которой в обиходе науки предупреждал известный физик проф. А.Г. Чертов, призывая конкретизировать смысловую нагрузку и границы применения вводимых терминов. За последнее время в науке, балансирующей на рубеже познанного и непознанного, все чаще появляются физические понятия, обозначаемые словами, которые совсем недавно можно было встретить в лирических новеллах.

Это хорошо видно на примере таких характеристик элементарных частиц, как «цвет», «странность» или «очарование». Это вынужденная мера, свидетельствующая о сложности изучаемых процессов, перед которой пасует образное воображение ученых. Как писал Р. Фейнман: «Наша наука предъявляет воображению немислимые требования. Степень воображения, которая теперь требуется в науке, превосходит то, что требовалось для некоторых прежних идей. Нынешние идеи намного труднее вообразить себе». Новые материалы и способы управления фрикционными параметрами узлов трения, адаптивные к изменяющимся внешним условиям взаимодействия или наделенные собственными внутренними механизмами стабилизации фрикционных процессов, способствовали вхождению в обиход трибологии и прочному закреплению в ней понятий, связанных с термином «интеллект».

Содержание термина «интеллект», традиционно присущего лишь высшим формам живой природы, бесспорно сложно, многогранно и поэтому «размыто» в потоке доступной для анализа информации. Говорят, что на одном из конгрессов по искусственному интеллекту, председательствующий на нем «отец кибернетики» Н. Винер закрыл заседание, не получив от аудитории ответа на вопрос «Что такое интеллект?». Применительно к техническим системам понятия, связанные с термином «интеллект», бесспорно, отличаются от аналогичных характеристик биологических объектов: человека, дельфина. Проявление интеллекта можно рассматривать как высший этап развития (эволюции) сложной системы, определяющий полноту и скорость реализации ее уравнивания с внешней средой, а также выбор пути, по которому в системе происходят изменения: прогрессивный (самоусложнение) или регрессивный (деструкция).

Существует мнение, что практически любое вещество, помещенное в зону трения или адсорбированное поверхностями фрикционного контакта, может выступать в роли смазочного материала, эффективность действия которого определяется его микро- и мезоструктурой. На сегодняшний момент в трибологии накоплено достаточно фактов чтобы подтвердить это утверждение:

порошки чистых металлов, их сплавов, оксидов, солей, органических, природных (например, минералы) соединений, ультрадисперсные алмазы, фуллерены, органокремнеземы; всевозможные смазочные среды, в том числе вода, инертные и активные (например, кислород, азот) газы в определенных условиях и сочетаниях материалов способны повысить износостойкость и антифрикционность узлов трения.

Данная возможность реализуется благодаря приспособляющим механизмам, действующим во фрикционных системах как открытых термодинамических системах: химическая пассивация поверхности, изменение ее физико-механических свойств, состава, микрогеометрии и т.д. Но может ли трибосистема, склонная к адаптации и изменению параметров внешнего окружения посредством внутренних механизмов трансформации своих свойств, в пределе соответствующего самоорганизации, считаться наделенной интеллектом?

Со времени открытия Д.Н. Гаркуновым и И.В. Крагельским явления ИП прошло более полувека. Этот эффект назван эффектом безызносности вследствие сопутствующих ему мизерных уровней изнашивания и энергетических потерь в трибосопряжении, а также из-за близости форм проявлений данного эффекта к объектам живой природы. Но до настоящего времени среди трибологов существует разрозненное суждение о правомочности отнесения к самоорганизующимся объектам трибосопряжения, работающих в режиме исключаяющих проявление эффекта безызносности, вследствие чего к которым ограниченно может быть применено понятие «интеллект».

Самоорганизация – универсальное свойство материи, двойственное ко второму началу термодинамики, в котором феномен трения выступает как один из основных типов возмущения равновесного состояния системы. Самоорганизация может прогрессировать в открытых системах (уровень организации которых высок), обладающих достаточным количеством взаимодействующих между собой подсистем, развитыми связями между ними и относительно высокими значениями вероятностей флуктуации (градиентов интенсивных величин, например химического потенциала, являющегося одной из основных термодинамических сил эволюционных изменений в трибосистеме). В противном случае эффекты от синергетического взаимодействия подсистем будут недостаточны для проявления коллективного поведения элементов системы.

Простые системы не способны ни к спонтанной адаптации, ни к развитию, а при получении извне избыточного количества энергии необратимо разрушаются. Простое вещество, обладающее такой характеристикой как вязкость (внутреннее трение), открытое для потоков энергии реагирует на механическое воздействие образованием некоторого количества избыточной энергии (и созвучной этому понятию энтропии), неуклонно возрастающей с ростом приложенной силы и приводящей к разрушению его структуры.

Узлы трения сложные, открытые для потоков энергии и вещества диссипативные системы, являются ярчайшим примером демонстрации синергетических эффектов в неживой природе. В работе Р. Феймана выделено целых 14 эффектов самоорганизации при трении и 9 признаков синергетичности систем. Исторически первым синергетическим эффектом, обнаруженным задолго до классических ячеек Бенара, стало явление самопроизвольного образования и поддержания в зазоре трущихся тел гидродинамического клина – за счет изменения микрогеометрии, неравномерной температурной деформации поверхности и других возможностей.

Еще одним эффектом самоорганизации служит режим стеклования смазки или эластогидродинамическая смазка, возникающая благодаря фазовым переходам в структуре смазочной пленки за счет саморегулирования ее вязкости, сохраняющего ее устойчивость и при превышении внешней нагрузки критических для целостности смазочной прослойки значений. В состоянии самоорганизации трибосистемы способны проявлять адаптивное поведение, выражающееся в наименьших потерях энергии и (или) максимально возможной износостойкости. Узел трения, как открытая термодинамическая система, в той или иной мере самостоятельно поддерживает достаточные для воспроизводства своей структуры и свойств условия, что наглядно отражено в существовании стадии установившегося изнашивания.

В целях ранжирования понятия «интеллектуальный», применительно к трибосистемам, функционирующим в различных режимах трения, введем несколько уровней их возможной организации: динамически стабильный, адаптивный и эволюционный.

Динамически стабильный и адаптивный – это пассивные уровни самоорганизации трибосистемы, они связаны со средой и непрерывно производят энтропию. В адаптивных трибосистемах структура законов развития фрикционных процессов определяется энтропийной природой генезиса силы трения, из-за которой корреляция между коэффициентом трения, температурой, интенсивностью изнашивания может быть неоднозначна: малая сила трения не всегда свидетельствует о симбатном уменьшении износа. Эта форма самоорганизации трибосистемы существует благодаря наличию управляющих сигналов положения системы в состоянии, близком к равновесному, и корректировки ее положения вблизи него внутренними механизмами: уничтожением старых и образованием новых связей.

Примером адаптивной системы служит формирование и разрушение поверхностных оксидных пленок при трении. Толщина и полнота заполнения площади контакта слоем оксида регулируется температурным фактором, скоростью подвода реагирующих элементов в зону фактического контакта и последовательностью деградационных процессов в структуре контактирующих материалов.

Так износ, как негативное проявление действия фрикционных сил, способствует очистке поверхности от загрязнений и появлению на ней ювенильных участков; увеличению доли адгезионных центров, обладающих избытком поверхностной энергии, и, соответственно, при должных условиях, плакированию их защитной пленкой оксида. Но оксидные пленки хрупки, не способны многократно деформироваться и легко разрушаются при трении, замыкая такой адаптивный процесс, необратимо унося вследствие износа из реагирующей системы часть инертного (оксид) по отношению к смазочной среде вещества. К такой адаптивной форме самоорганизации трибосистемы как структура ячеек следует отнести также саморегулирование микропараметров поверхностного слоя при использовании частиц мягких и твердых абразивов.

Как было отмечено, присутствие в смазочном материале сверхтвердых частиц ультрадисперсных алмазов при трении пластичных материалов приводит к формированию в их поверхностных слоях наноразмерной ячеистой субструктуры, эффективно поглощающей энергию трения, что повышает износостойкость сопряжения. Сделан прогноз о возможности использования для этих целей минералов, обладающих высоким уровнем внутренней энергии. Исследования минеральных наполнителей также установили склонность поверхностных слоев материалов к образованию ячеистой структуры, воспроизводящей их грубогетерогенную природу, отчетливо регистрируемую методами микроскопии. Более того, микрофотографии выделений по границам кристаллов аустенитной стали при ее термической выдержке в вакууме, выполненных и опубликованные проф. Гаркуновым Д.Н. также обнаруживают ячеистое строение.

Г. Польцер и В. Эбелинг [14] показали, что можно возбуждать процессы самоорганизации при добавлении к смазочному материалу микроабразива с диаметром зерна менее 5 мкм. К адаптивным формам самоорганизации можно отнести образование регулярного рельефа поверхности. Однако адаптивная самоорганизация сопровождается неуклонным изменением объема механической системы и расходом ее активных агентов.

Эволюционный – это активный уровень самоорганизации трибосистемы, содержащий энтропийную накачку внутри нее и обладающий высокой степенью внутренней организации. В эволюционирующей системе возникшие изменения не устраняются, а накапливаются, и усиливаются вследствие общей положительной реакционной связи между ее подсистемами, что может привести к возникновению нового порядка и новых, более сложных, чем исходные, структур, названных диссипативными. Диссипативная структура может включать быстрорелаксирующие (градиенты скоростей, электрического потенциала) и долгоживущие с памятью (градиенты и ячейки концентрации, плотности дислокации, автоколебания) компоненты пространственно-временных форм упорядочения динамических состояний.

К эволюционным системам наиболее близко подходит только явление ИП. Несмотря на то, что ИП также как гидродинамический клин, стеклование смазки требует специфических условий генерации, после входа фрикционной системы в режим ИП задействуются автокомпенсационные механизмы саморегуляции, поддерживающие постоянство параметров ее функционирования, не спадающие довольно долго и после прекращения трения. Например, пассивированная при трении оксидной пленкой поверхность металла, несмотря на снижение коэффициента трения и интенсивности изнашивания, обладает ограниченной, по сравнению с ИП энергоемкостью.

Подобная аналогия видна и при металлоплакировании, состоящим в трибостимулированной адгезии порошка металла или сплава на поверхности трения, вне реализации условий ИП; или в не совсем правомочно отнесенной к ИП трибополимеризации, являющейся одной из составляющих действующей при трении системы снижения износа, но никак не подменяющей само понятие ИП. Повторное нагружение материалов покрытых такими пленками сопровождается их «жесткой» вторичной приработкой.

В режиме устойчивого ИП, зависимость материала защитной пленки от условий нагружения выражена менее, чем при граничной смазке, а целостность сформированной диссипативной структуры автоволнового и ячеистого типов в форме незатухающих скоплений дефектов и продуктов трибохимического синтеза новых фаз исчезает постепенно, а не сразу после прекращения трения, позволяя «сгладить» протекание вторичной приработки.

Эффект автоколебаний концентрации активных агентов смазочной среды (меди) при ИП, который можно рассматривать как проявление пространственно-временного упорядочения реакционной системы. Это явление дополнительно подтверждает более высокую форму организации трибосистем в режиме ИП по сравнению с другими режимами трения, в которых практически необратимо расходуются компоненты смазочной среды.

Проявление «интеллекта» в трибосистеме, реализующей эффект безызносности связано с набором особенностей ее фрикционного поведения, которые можно сопоставить с поведением биологических систем. Если рассмотреть эволюцию трибосистемы в режиме безызносности как траекторию в фазовом четырехмерном пространстве, то в такой системе, несмотря на строгую индивидуальность характеристик каждого отдельно рассмотренного случая трения, прослеживаются общие черты развития, соответствующие процессам ее самоусложнения, демонстрирующие определенную диалектическую связь между неповторимыми частными и общими закономерностями ее существования.

В общем случае в рассматриваемом реакционном объеме для каждого отдельно взятого материала трения, условий его активации и диссипации механической энергии непрерывно изменяются концентрации активных агентов

среды, ингибиторов изнашивания, адгезионных центров, продуктов выхода трибореакций, но в этом круговороте событий и инициирующих их причин вне зависимости от условий трения просматриваются исключительные черты, присущие живому организму: способность приспосабливаться к изменяющимся условиям, сопротивляться, замедлять, изменять течение всеобъемлющего, разрушительного протопроцесса тепловой смерти.

Яркой формой отражения этого процесса в неживой природе служит эффект безызнности. В составе механизма его зарождения и развития возможно нарушение причинно-следственных связей, вызванное аномальным поведением самоорганизующейся трибосистемы во времени. В режиме безызнности вещество трения способно не только освободиться от излишков энтропии, но за счет специфических механизмов, наиболее изученными из которых являются механизмы возникновения вакансионно-дислокационный неустойчивости и неконсервативного движения дислокаций, «утаивать» часть произведенной энтропии, направляя ее «излишки» на прогрессивную реорганизацию – усложнение своей структуры.

С открытием эффекта безызнности и последующей научной проработкой определяющих и сопровождающих такое поведение механических систем явлений, стало возможным вычленение общей закономерности, заключающейся в стремлении к формированию на поверхностях трения сложных, схожих по функциональному назначению и структурной организации рабочих слоев (третьих тел), ингибирующих трение и износ.

Свойство непрерывного поддержания своего упорядоченного развития сближает трибосистемы, реализующие самоорганизацию, и биологический объект с тем отличием, что последний имеет большее число путей этого поддержания: здоровое питание, комфорт, медицинское обеспечение. Трибоинтеллект – способность узла трения переходить к режимам самоорганизации, наивысшей формой проявления которого служит ИП. Наиболее общие признаки проявления «интеллектуальной» составляющей трибосистем заключаются в следующем:

1. Селективной способности активных агентов фрикционной системы находить и залечивать наиболее изношенные области поверхностного слоя материалов трения, являющиеся мощными адгезионными центрами с максимально дефектной кристаллической структурой и обладающими вследствие этого высоким уровнем свободной энергии;
2. Формировании самовосстанавливающейся смазочной пленки с высокими противоизносными и антифрикционными свойствами;
3. Самопроизвольном поддержании устойчивого концентрационного баланса активных агентов смазочной среды для сохранения постоянства фазового состава и свойств диссипативных структур, динамического равновесия входящих и выходящих из трибосистемы энергетических потоков, обеспечивающих минимальный энтропийный уровень и соответственно

высокую способность трибосистемы к самоусложнению, которое в конечном итоге обеспечивает наиболее эффективное снижение сил трения и минимальный уровень структурной деградации материалов.

«Интеллектуальные материалы» для узлов трения способны вывести инженерную составляющую трибологии – трибологию на некоторые универсальные решения, позволяющие упростить до уровня «математической формализации» процесс разработки материалов и конструкций для узлов трения. В технических науках реализация такой возможности большая редкость, поскольку решения поставленных задач ищутся, проходя стадии трудоемких лабораторных, стендовых, натурных испытаний, анализа статистики наработки на отказ, аварийных выходов из строя объектов техники, а также благодаря интуиции инженеров.

В то, что существуют общие концепции решения основных задач триботехники, верили многие видные ученые. Выдающийся белорусский триболог академик В.А. Белый в работе указывал на два, наиболее эффективных, по его мнению, способа регулирования эксплуатационных свойств узлов трения:

1. Разработка новых материалов, содержащих в себе вещества, способствующие формированию на поверхностях трения защитных антифрикционных пленок;
2. Введение извне в контактную зону «активных агентов», которые взаимодействуя в процессе трения с поверхностями, обеспечивали бы необходимые фрикционные свойства.

Оба этих подхода реализуются в рамках новых принципов трибологии на основе самоорганизации. Материаловедческие методы наиболее проработаны в направлении улучшения триботехнических характеристик узлов трения. В первую очередь это относится к синтезу присадок к смазочным и полимерным композиционным материалам, на который огромное влияние оказали разработанные за последние два десятилетия положения координационной трибохимии [2,17].

Список литературы

- 1 Санин П.И., Шепелява Е.С., Клейменов Б.В. Некоторые данные об активности присадок, содержащих группу CCL₃ // Химия и технология топлив и масел. 1960. №8. 24–28.
- 2 Гаркунов Д.Н. Триботехника. Износ и безызносность. М.: Издательство МСХА., 2001.
- 3 Евдокимов В.Д. Семов Ю.И. Экзоэлектронная эмиссия при трении. М.: Наука, 1973.
- 4 Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. М.: Машиностроение, 1982. 135 с.
- 5 Чертов А.Г. Физические величины. М.: Высшая школа, 1990. 335с.
- 6 Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Электродинамика, Т.6. М.: Мир, 1977. 343с.
- 7 Чигоренко Г.Г., Пономаренко А.Г., Бурлов А.С. и др. Влияние химического строения координационных соединений переходных металлов на смазочные характеристики масел // Трение и износ. 2006. №2(27). С. 225–232.
- 8 Поляков А.А. Опыт исследования диссипативной структуры избирательного переноса в металлической пленке при трении (динамическая трибология) // Трение и износ. 1992. №2(13). С. 388–402.
- 9 Поляков С.А. Теоретический анализ основных механизмов эволюции трибосистем при избирательном переносе // Сб. Долговечность трущихся деталей машин; Вып.3. М: Машиностроение, 1988. С. 3–27.
- 10 Бершадский Л.И. О самоорганизации и концепции износостойкости трибосистем // Трение и износ. 1992 (13), № 6. С. 1077–1094.
- 11 Витязь П.А., Жорник В.И., Кукареко В.А., Камко А.И. Формирование износостойких поверхностных структур и механизм их разрушения при трении в среде смазочного материала, модифицированного ультрадисперсными алмазографитовыми добавками. Ч.1. Триботехнические свойства // Трение и износ. 2006 (27). №1.
- 12 Шпеньков Г.П. О явлении избирательного переноса/ Сб. Долговечность трущихся деталей машин; Вып.4. М.: Машиностроение, 1990. С. 3–1.
- 13 Долгополов К.Н., Любимов Д.Н., Пономаренко А.Г., Чигаренко Г.Г. и др. Структура смазочных слоев, формируемых при трении в присутствии присадок минеральных модификаторов трения // Трение и износ. 2009(30), №5. С. 516–521.

- 14 Польцер Г., Эбелинг В. Внешнее трение твердых тел, диссипативные структуры, самоорганизация/ Сб. Долговечность трущихся деталей машин; Вып.3. М.: Машиностроение, 1988. С.89–95.
- 15 Погодаев Л.И., Кузьмин В.Н. Структурно-энергетические модели надежности материалов и деталей машин. СПб.: Академия транспорта РФ, 2006. 608с.
- 16 Точигина Т.А., Карасик И.И., Буше Н.А., Бершадский Л.И. Экспериментальная оценка наследственной и диссипативной характеристик приработки // Трение и износ. 1986(7). №2. С.206–213.
- 17 Любимов Д.Н., Долгополов К.Н. Фундаментальные основы эволюции трибосистем. Шахты: ФГБОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2011. 95с.
- 18 Белый В.А. Проблемы создания композиционных материалов и управление их фрикционными свойствами // Трение и износ. 1982(3), № 3. С. 389–396.
- 19 Кужаров А.С., Рябухин Ю.И. Комплексообразование при трении // Трение и износ. 1991(12). № 1. С. 99–107.
- 20 Любимов Д.Н., Пинчук Л.С., Долгополов К.Н. Трибофизика. Р-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2011. 296 с.
- 21 Громько Г.Д. Влияние граничных процессов на граничное трение с тяжелыми режимами // Теория трения, износа и смазки. 1975. № 3. С. 124–125.
- 22 Поляков А.А. Термины избирательного переноса/ Сб. Долговечность трущихся деталей машин; Вып.4. М.: Машиностроение, 1990. С. 11–15.
- 23 Поляков А.А. Самоорганизация структуры избирательного переноса / Сб. Долговечность трущихся деталей машин; Вып. 3. М.: Машиностроение, 1988. С.45–89.
- 24 Кужаров А.С., Онищук Н.Ю. Металлоплакирующие смазочные материалы / Сб.: Долговечность трущихся деталей машин; Вып. 3. М.: Машиностроение, 1988. С. 96–144.
- 25 Кужаров А.С. Координационная трибохимия избирательного переноса / Автореф. дисс. докт. техн. наук. Ростов-на-Дону, 1991. 2с.
- 26 Любимов Д.Н., Шахбазян В.В., Логинов В.Т., Гречко В.О. и др. Антифрикционная полимерная композиция / А.с. № 1553544, по заявке №4367929 от 21.01.1988г.
- 27 Гаркунов Д.Н. Научные открытия в триботехнике. Эффект безызносности. Водородное изнашивание металлов. М.: МСХА, 2004. 384с.

- 28 Мюне В. Избирательный перенос рабочего материала в подшипникахскольжения / Сб.: Исследования по триботехнике. М.: НИИ информации помашиностроению, 1975. 125с.
- 29 Балабанов В.И. Повышение ресурса дизелей фрикционным латунированием шеек коленчатых валов в ремонтном производстве. Автореф. канд. дис. Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина, 1992. 17 с.
- 30 Балабанов В.И. Финишная антифрикционная безабразивная обработка деталей дизелей //Тракторы и сельскохозяйственные машины. № 12. С. 23–25.
- 31 Кремешный В.М. Новые способы повышения износостойкости тяжело нагруженных узлов трения // Обзорная информация. ЛатНИИНТИ. 1987. 35 с.
- 32 Лозовский В.Н. Фрикционное латунирование как метод повышения антифрикционных свойств стальных деталей авиационной техники. Автореф. канд. дис. Киевский институт инженеров гражданской авиации. 1961. 20 с.
- 33 Намаконов Б.В., Кисель В.В., Лялякин В.П. Повышение долговечности гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания способом ФАБО. Сб. «Долговечность трущихся деталей машин»; Вып. 4. М.: Машиностроение, 1990. С.139–144.
- 34 Отчет института коррозии (ИКОР) Комитета по оборонным отраслям промышленности РФ. Опытная разработка основ технологического процесса нанесения металлоплакирующих покрытий на детали подшипника сателлита авиационного ГТД / Н.Н. Добромислов и др. 1993.
- 35 Повышение износостойкости на основе избирательного переноса / Сб. статей под ред. Д.Н. Гаркунова. М.: Машиностроение, 1977. 211 с.
- 36 Польцер Г., Фирковский А., Ланге И. и др. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) и избирательный перенос / Сб. статей. Долговечность трущихся деталей машин. Вып. 5. Машиностроение, 1990. С. 85–122.
- 37 Потапов Г.К., Балабанов В.И. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) гильз цилиндров и шеек коленчатых валов двигателей // Эффект безыноса и триботехноии. № 3–4, 1994. С. 48 –53.
- 38 Руководство по применению ФАБО деталей и технологической жидкости «Велап» при капитальном ремонте, обкатке и эксплуатации ДВС. РТМ 10 Россия. 01.0018–92. Министерство сельского хозяйства РФ.

- 39 Румянцев Г.И. Фрикционное латунирование деталей топливной аппаратуры / Сб. «Повышение износостойкости на основе избирательного переноса». М.: Машиностроение. 1977. С.155–159.
- 40 Соловей Н.Ф., Тороп В.В., Матюшенко В.Я. Наводороживание трущихся деталей цилиндра-поршневой группы ДВС // Трение и износ. 1985. Т.4. С. 752–755.
- 41 Суранов Г.И. Повышение долговечности транспортных двигателей / Г.И. Суранов. М.: УГТУ, 2011. 335с.
- 42 Суранов Г.И., Шахтаров Ю.А., Прищепов В.А. Повышение долговечности двигателей транспортных машин созданием избирательного переноса при трении // Двигателестроение. 2007. № 1. С.34–38.
- 43 Латунный водомасляный теплообменник в поддоне двигателя для создания условий избирательного переноса при трении / Г.И. Суранов, В.Н. Киселев, И.В. Филиппев // Ремонт, восстановление, модернизация. 2010. № 6. С. 18–24.
- 44 Терешкин С.А., Чекулаев О.В. Фрикционное латунирование деталей двигателей. Сб. «Повышение износостойкости на основе избирательного переноса». М.: Машиностроение. 1977. С. 152–155.
- 45 Пат. № 2390640 РФ. Способ обогащения масла системы смазки двигателя внутреннего сгорания легирующими элементами цветных металлов и устройство для его осуществления (варианты) / Г. И. Суранов, В. Н. Киселев; приоритет изобретения 09 января 2008 г. 2 с.
- 46 Shchedrin A.V., Ulyanov V.V., Bekaev A. A., Skoromnov V. M.Improving the effectiveness of combined drawing methods by regularizing the microgeometry of the tool working surface // Russian Engineering Research. Vol.26. № 11. p. 35–38, 2006, Allerton Press Inc., New-York.
- 47 Shchedrin A. V., Ulyanov V. V., Bekaev A. A., Skoromnov V.M. Benefits of a draw plate with regular microrelief // Russian Engineering Research. Vol. 28. №4. p. 357–361, 2008, Allerton Press Inc., New-York.
- 48 Щедрин А. В., Ульянов В. В., Чихачёва Н. Ю. и др. Трибология как фундаментальная основа системного проектирования конкурентоспособных технологических объектов // Ремонт, восстановление, модернизация. 2009. №4. С. 15–20.
- 49 Научное открытие, диплом №41. Эффект избирательного переноса при трении (эффект безызносности) / Д. Н. Гаркунов, И. В. Крагельский. Открытия в СССР 1957-1967 гг. М.: ЦНИИПИ, 1968. С. 52–53.
- 50 Shchedrin A.V., Ulyanov V.V., Bekaev A.A., Chikhacheva N. Yu. Efficient hole broaching with regularized surface microgeometry of deforming

elements // Russian Engineering Research. Vol. 29. №9. p. 911–915, 2009, Allerton Press Inc., New-York.

- 51 Shchedrin A.V., Ulyanov V.V., Bekaev A.A Improving the use lubricants and coolants fluids in machining // Russian Engineering Research. Vol.26. №10. p.38–39, 2006, Allerton Press Inc., New-York.
- 52 Shchedrin A.V., Ulyanov V.V., Bekaev A.A., Skoromnov V. M.Bauschinger effect in complex machining methods // Russian Engineering Research. Vol. 28. №8. p. 797–799, 2008, Allerton Press Inc., New-York.
- 53 Щедрин А.В., Ульянов В.В., и др. Повышение эффективности комбинированной обработки отверстий на основе регуляризации микрогеометрии поверхности рабочих элементов инструмента // Ремонт, восстановление, модернизация. 2009. №6. С. 14–19.
- 54 Щедрин А.В. и др. Комплексная оценка эффективности метода комбинированного прошивания отверстий с противодавлением технологической смазки // Ремонт, восстановление, модернизация. 2008. № 2. С. 46–49.
- 55 Щедрин А.В., Гаврилов С.А., Ерохин В.В. и др. Повышение качества и производительности методов комбинированной обработки инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности на основе применения металлоплакирующих смазок // Упрочняющие технологии и покрытия . 2011. №8. С. 21-25.
- 56 Щедрин А.В., Гаврилов С.А., Зинин М.А. Оптимизация рецептуры металлоплакирующих смазок для комбинированного дорнования отверстий в заготовках из нешлифуемых цветных сплавов // Вестник машиностроения. 2012. №9. С. 76-79.
- 57 Щедрин А.В., Козлов А.Ю., Гаврилов С.А., Поляков А.О. Влияние состава и применение металлоплакирующих смазочных материалов на поверхностное пластическое деформирование инструмента с регулярным микрорельефом//Вестник машиностроения. 2013. №5. С. 79-81.
- 58 Сергеев Е.С., Гаврилов С.А., Зинин М.А., Щедрин А.В., Поляков А.О., Козлов А.Ю. Инновационные методы комбинированной обработки// Упрочняющие технологии и покрытия. 2013.№10. С.34,35.

Глава 4. Реализация трибологии на основе самоорганизации в промышленности, на транспорте и в сельском хозяйстве

4.1. Общие сведения

За последнее десятилетие использование ИП значительно расширилось. В настоящее время трудно указать область машиностроения, в которой ИП не был бы применен или апробирован.

Опыт применения ИП в промышленности показывает, что успех перехода к использованию принципиально новых смазочных материалов для узлов трения, технологических процессов, новых материалов и конструкций подвижных соединений достигается только в тех случаях, когда проводилась систематическая научно-исследовательская работа применительно к конкретным узлам трения машин данной отрасли.

В этом разделе излагаются результаты исследований, испытаний и использования на практике эффекта безызносности, выполненных специалистами отдельных отраслей промышленности.

4.1.1. Авиационная техника

Первый опыт применения эффекта безызносности в узлах трения самолетов относится к 1960-м гг. В то время на самолетах Ил-28 наблюдался интенсивный износ верхних бронзовых букс основных стоек шасси (через 250–300 посадок приходилось производить ремонт стоек – заменять изношенные бронзовые бухты новыми). После проведения цикла исследований, стендовых и эксплуатационных испытаний, применяемая в стойках шасси спиртоглицериновая смесь была заменена на жидкость АМГ-10, которая реализовала в парах трения бронза БраЖМц – сталь эффект безызносности. Проблема износостойкости узлов трения шасси была снята. Бронзовые буксы стоек шасси перестали изнашиваться и их замена за весь период эксплуатации самолетов не проводилась.

В те же годы на самолетах ряда фирм (П.О. Сухого, А.Н. Туполева, А.И. Микояна) слабым местом в отношении износостойкости были шарнирно-болтовые соединения планера, управления и шасси. В этих узлах наблюдался наиболее опасный вид изнашивания – схватывание поверхностей трения. Для устранения подобных случаев была разработана новая технология покрытия стальных деталей тонкими пленками бронзы, латуни и меди – метод фрикционного латунирования поверхностей трения деталей – ФАБО. В дальнейшем было убедительно показано, что процесс ФАБО является одним из самых эффективных методов повышения износостойкости, устранения задиров, уменьшения времени приработки цилиндров двигателей внутреннего сгорания, шеек коленчатых валов, шестерней и колес зубчатых зацеплений, плунжерных и золотниковых пар топливной аппаратуры, силовых цилиндров гидравлических систем и других деталей.

Кроме метода ФАБО для смазывания тяжело нагруженных трущихся деталей авиационной техники были разработаны, так называемые «металлоплакирующие» смазочные материалы, которые при работе реализуют эффект безыносного трения.

Металлоплакирующий смазочный материал «Свинцоль-01» (с 1960 г.) и смазочный материал «Атланта» (с 1973г.) применяются по настоящее время. Достаточно отметить, что высокая надежность работы шарнира крыла самолета типа «СУ» с изменяемой стреловидностью была достигнута благодаря применению смазки «Атланта». При смазке «Атланта» пороговый коэффициент трения достигается после 100 применений шарнира, в то время как при ранее применяемой смазке «Циатим-201» это происходило после 13–17 применений.

В целом технический эффект от применения металлоплакирующих смазочных материалов в тяжело нагруженных узлах самолета, по данным ОКБ им. П.О. Сухого, состоит из следующих элементов: увеличения нагрузки узла трения в 1,5–2 раза (до 100...120 МПа); снижения массы бронзовых подшипников на 25 %; повышения износостойкости деталей в 2 раза; увеличения периода между смазыванием узлов трения не менее чем в 3 раза; снижения общих затрат на эксплуатацию в 2–3 раза.

4.1.2. Машины и механизмы морского флота

Известно использование морской воды в качестве смазочной среды для действующих подшипников судов морского флота. В конце прошлого столетия была решена научно-техническая проблема – разработана новая конструкция подшипника скольжения, которая работала в режиме ИП при смазывании морской водой при высоких нагрузках.

Благодаря такому решению, отпала необходимость подводить и отводить смазку к подшипникам, работающим за бортом. Ранее на некоторых объектах только медных трубок для подвода и отвода смазочного материала требовалось несколько километров. Также следует учесть сокращение монтажных работ, повышение надежности работы подшипников и решение экологической проблемы.

Институтом Севгипрорыбфлот (г. Мурманск) накоплен большой опыт использования эффекта безыносности в узлах трения судовых технических средств (главные и вспомогательные двигатели, подшипники валопроводов, редукторы сепараторов топлива и масла, винтовые компрессоры и т.д.).

Работа велась по двум направлениям:

1. Применение на судах, находящихся в эксплуатации, антифрикционной медьсодержащей присадки МКФ-18 к штатному маслу;

2. Использование методов ФАБО трущихся деталей дизелей и другого оборудования в период их ремонта с последующей обкаткой по сокращенной программе с использованием присадки МКФ-18.

Присадка МКФ-18 применялась в главных двигателях и механизмах на 15-ти судах ПСТ пр. 1332; 16-ти судах ТСМ пр. 333 и НИС пр. 833 и 10-ти судах СРТМ пр. 502ЭМ.

В результате использования технологии ФАБО сократилось время обкатки дизелей в 1,5 раза после капитального ремонта, улучшились технические параметры работы дизеля (температурный режим, шумность, расход топлива и др.). Работы проводились по технической инструкции 8844-М6-001 ТИ, согласно которой ФАБО подвергаются коленчатый вал, цилиндрические втулки, поршневые кольца, распределительный вал, цапфы шестерен механизма газораспределения.

4.1.3. Механизмы и аппараты химических производств

Основной причиной выхода из строя трущихся деталей машин и аппаратов химических производств является коррозионно-механический вид изнашивания. Обследование оборудования на химических комбинатах сотрудниками ЛенНИИХимМаша: аппаратов с перемешивающими устройствами при производстве капролактама, выращивания микроорганизмов; червячных машин при производстве синтетических каучуков; валковых устройств и т.д. показало, что узлы трения этих машин подвержены еще и водородному изнашиванию, часто в сочетании с другими видами изнашивания (абразивным и фреттинг-коррозией).

Установлены четыре основных метода защиты узлов трения химического оборудования от водородного изнашивания: 1) нанесение защитных покрытий (нанесение оксидных пленок, газопламенное напыление и др.) непроницаемых для водорода; 2) применение легированных сталей и сплавов устойчивых к действию водорода; 3) ингибирование рабочей среды (использование смазочного материала); 4) электрохимический метод анодной или катодной защиты.

Также были установлены области применения эффекта безызносности при трении стали 14Х17Н2 по стали 12Х18Н10Т и материала ВК6 по ВК6 от различных параметров PV.

Практические результаты работ.

1. Разработана композиция Ф40Б70 на основе фторопласта 40 с добавлением 70 % бронзовой дроби для изготовления сепараторов шарикоподшипников электроприводов аппаратов с механическим перемешивающим устройством. Испытания в различных смазочных средах (кислые электролиты) выявили высокую износостойкость таких

шарикоподшипников. Дорожки трения подшипников при работе покрывались тонким слоем меди, что способствовало компенсации износа, стабильности зазоров, снижению уровня шума и вибрации электродвигателя.

2. Разработана конструкция торцевого уплотнения вала химических аппаратов с применением твердосплавного материала, состоящего из релита и меди. Часть деталей изготавливали из стали, легированной медью, хромом и никелем. При этом поверхности трения вала и опоры работали в режиме безызносности.
3. В аксиальных уплотнительных устройствах химических аппаратов по перекачке слабокислых и слабощелочных растворов с кислотным числом $pH = 6,8 \dots 8$ использовались кольца с нанесенными покрытиями релит–медь. Такое покрытие колец при работе способствовало реализации эффекта безызносности в контактных кольцах.
4. Разработаны металлопластмассовые опоры скольжения со вставками-протекторами из фторопластовой композиции Ф4-К20 и бронзы БрОЦС5-5-5 с чередованием их по окружности, обеспечивающими режим безызносного трения.
5. Предложена новая конструкция опоры, корпус которой выполнен из бронзы БрАЖ9-4, а вставки-протекторы – из фторопластовой композиции Ф4- К20. Такие подшипники имеют долговечность (в том числе для крупногабаритных аппаратов с тяжелыми валами) в 3–4 раза выше, чем подшипники из пластмасс. Особенно эффективно применение таких подшипников скольжения в опорах аппаратов, рабочая среда которых содержит абразивные частицы.
6. Разработаны шестеренные устройства, предназначенные для выгрузки полистирола из аппаратов и транспортирования его по трубопроводам. В этих устройствах бронзовые подшипники скольжения работают при давлении до 2 МПа, скорости скольжения до 0,235 м/с, температуре 180 °С; смазывание осуществляется расплавом полимера, т.е. транспортируемой рабочей средой. Анализ полученных результатов позволил установить, что данная пара работает в режиме эффекта безызносности.

В целом можно отметить, что приведенные методы повышения износостойкости узлов трения, основанные на эффекте безызносности, широко используются в химической промышленности.

4.1.4. Машины и аппараты бытовой техники

Наиболее распространенным механизмом, в котором реализуется эффект безызносного трения, является компрессор бытового холодильника. Узлы трения компрессора, изготовленные из стали (коленчатый вал, подшипники

скольжения, поршень и цилиндры), работают в режиме безыносного трения в течении многих лет (более 30...40) практически без износа.

В процессе работы поверхности трения деталей самопроизвольно покрываются тонкой медной пленкой толщиной 1...2 мкм, которая предохраняет поверхности от непосредственного контакта. Пленка формируется из ионов меди, образующихся в результате избирательного растворения медных трубок охладителя масло-фреоновой смесью (50 % масла и 50 % фреона). В зону контакта трущихся деталей ионы меди доставляются циркулируемым смазочным материалом. Активность масло-фреоновой смеси по отношению к медным трубкам охладителя повышается в результате образования в зоне трения при начальной работе компрессора активных соединений.

В Московском государственном университете сервиса работы по изучению эффекта безыносности и водородного изнашивания металлов применительно к машинам и аппаратам бытовой техники ведутся более 40 лет. На базе изучения процессов, происходящих в зоне контакта деталей компрессора холодильника, учеными университета совместно с Самарским филиалом ВНИИ НП была разработана металлоплакирующая присадка к смазочным материалам МКФ-18, которая более 25 лет используется в ряде отраслей промышленности.

Разработан комплекс технологических и эксплуатационных методов повышения срока службы бытовых машин за счет снижения уровня диффузионно-активного водорода, например, металлоплакирование поверхностей деталей от проникновения водорода в стальные и чугунные поверхности во время эксплуатации машин; метод пластического деформирования в металлоплакирующих средах, позволяющий одновременно проводить уточнение поверхностей и нанесение защитного металлического покрытия; введение в сальниковую набивку металлоплакирующего материала в целях повышения износостойкости уплотнительного узла и др.

4.1.5. Металлообрабатывающее оборудование

Применение эффекта безыносности в металлообрабатывающем оборудовании проводилось с целью снижения шума, повышения износостойкости пар трения, снижения силы перемещения подвижных органов металлорежущих станков, уменьшения утечек в гидропередачах, а также повышения стойкости металлорежущего инструмента. Проанализированы сроки службы металлообрабатывающего оборудования 200 предприятий, из них на 156 выявлена необходимость проведения работ по повышению износостойкости узлов трения станков и механизмов с использованием эффекта безыносности. К ним относятся зубчатые передачи, направляющие станин и подвижных органов станков, аксиально-поршневые насосы, гидроприводы, винтовые передачи, подшипники скольжения, металлорежущий инструмент.

Разработаны и приведены в эксплуатационных условиях методы повышения износостойкости пар трения применительно к металлообрабатывающему оборудованию: ФАБО трущихся поверхностей + металлоплакирующая смазка (металлоплакирующий смазочный материал); замена пар трения из цветного металла на сталь– сталь + ФАБО + металлоплакирующая присадка к маслу; введение в смазочно- охлаждающую жидкость металлоплакирующих присадок.

Положительные результаты с получением безыносного трения были достигнуты на ряде заводов (Талдомский опытно-экспериментальный завод, Вильнюсский станкозавод «Жальгирис», Псковский завод зубчатых колес, Егорьевский станкозавод, Дмитровский завод фрезерных станков, Московский завод гидроприводов и др.). Отрабатывались технологические процессы ФАБО, составы технологических жидкостей, методы контроля; было изготовлено вспомогательное оборудование и инструмент для производства ФАБО деталей.

В результате проведенных работ установлено, что применение эффекта безыносности в станкостроении позволяет обеспечить:

- снижение энергоемкости станков на 10...20 %;
- увеличение срока сохранения качества точности в 1,5–3 раза;
- снижение уровня звукового давления;
- повышение плавности перемещения рабочих органов на 40 %;
- экономию цветных металлов;
- повышение стойкости инструмента в 2–5 раз.

4.1.6. Тяжелое машиностроение

Узлы трения крупногабаритных машин часто испытывают большие ударные нагрузки, недостаточное поступление смазочного материала (особенно в первоначальный период работы), низкие температуры окружающей среды, высокую влажность, вибрацию и другие неблагоприятные факторы, которые снижают долговечность трущихся деталей. Специалисты завода Уралмаш провели обширные работы по испытанию тяжелонагруженных узлов трения оборудования и заводской продукции с применением металлоплакирующей присадки МКФ-18 к смазочным материалам. Испытанию подвергались редукторы карьерных и шагающих экскаваторов, бурового оборудования и узлы трения технологического оборудования (коробки скоростей термопласт-автоматов, гидродинамические подшипники, насосы, станки и т.д.).

В результате испытаний выявлена устойчивая тенденция к полному или частичному восстановлению или стабилизации утраченных в процессе эксплуатации служебных характеристик машин и оборудования. Например, ресурс гидронасоса увеличился в 2,5 раза; прекратилось развитие усталостного выкрашивания зубьев быстроходной зубчатой передачи с зацеплением Новикова; снизилась шумность коробки скоростей на 15 % и вибрации – на 25%; в зубчатых передачах наблюдалось «залечивание» мелких питтингов;

снизилась температура на выходе из подшипника в пятивалковом каландере; расход смазочных материалов снизился в 2 раза в редукторах карьерных экскаваторов ЭКГ-20; уменьшилось время приработки зубчатых передач. Установлено, что с возрастанием в масле абразивных частиц, эффективность действия присадки МКФ-18 снижается.

4.1.7. Железнодорожный транспорт

Наиболее изнашиваемыми деталями тепловозов, лимитирующие их ресурс, являются поршневые кольца и цилиндрические втулки дизелей. Малый ресурс у тепловозов и вагонов имеют подшипники качения, устанавливаемые в колесных парах. Кроме того, к быстроизнашиваемым деталям железнодорожного транспорта относятся сами колеса и сопрягаемые с ними рельсы на криволинейных участках дороги. Роликовые подшипники колесных пар часто выходят из строя по причине разрушения контактных поверхностей колец и роликов до выработки их ресурса. В последнее время проблема износа трущейся пары колесо – рельс в России весьма обострилась. По данным технической литературы ресурс работы рельс на криволинейных участках вследствие износа за период с 1985 по 1996 гг. снизился в 3–10 раз, а износ колесных пар подвижного состава увеличился в 10–15 раз.

В результате исследований установлено, что рельсы и сопрягаемые с ними колеса изнашиваются, главным образом, в результате водородного изнашивания. Этому способствуют условия работы деталей, характерные для водородного изнашивания и насыщения поверхностей трения колесной пары водородом в процессе работы.

Уже было отмечено, что подшипники качения и цилиндры двигателей внутреннего сгорания изнашиваются также в результате водородного изнашивания. Таким образом, можно отметить три группы деталей железнодорожного транспорта, выходящие из строя в результате водородного изнашивания: цилиндрические втулки двигателей тепловозов и поршневые кольца, подшипники качения букс тепловозов и вагонов, рельсы и сопрягаемые с ними колеса.

Если это так, то можно полагать, что метод повышения износостойкости указанных трех групп деталей может быть универсален.

Наиболее приемлемым методом защиты от водородного изнашивания был выбран метод, основанный на образовании в зоне контакта металлоплакирующей пленки, исключаящей диффузию водорода в металл детали. Для этого были созданы металлоплакирующие смазочные материалы, композиции, присадки (например, МСК «Валена») к маслам и смазочным материалам, реализующим в узлах трения эффект безызносности. МСК «Валена» прошла широкую проверку как в лабораторных условиях, так и в эксплуатационных и показала положительные результаты. Износ цилиндрических втулок и поршневых колец, рельсов и колес резко снизился. Уменьшились шум

подшипников качения и повреждения дорожек колец и роликов, снизилось потребление смазочных материалов.

В 2005-2006 гг. на Кусковском заводе консистентных смазок организовано многотоннажное производство четырех видов новых смазочных материалов для основных типов трущихся деталей железнодорожного транспорта (редукторов, подшипников качения, дизелей локомотивов и пар колесо–рельс).

4.1.8. Сельскохозяйственная техника

В сельском хозяйстве эксплуатируется огромное количество тракторов, комбайнов, грузовых автомобилей и другой сельскохозяйственной техники. На ней одних двигателей внутреннего сгорания используется более 2,3 млн. Основная часть машин работает после капитального ремонта с ресурсом 30...50% от ресурса новых машин.

Основное внимание ученых было уделено разработке технологий ускоренной обкатки двигателей внутреннего сгорания и повышению работоспособности уплотнений картофелеуборочной техники. Обычно обкатка автомобильного двигателя составляет 30...40 ч, что соответствует 1000 км пробега автомобиля. Путем использования ФАБО цилиндров двигателей и применения разработанных присадок к смазочным материалам удалось в 2,5–3 раза сократить время обкатки двигателей и повысить ее качество.

Отметим, что повышение качества обкатки отремонтированных двигателей позволяет уменьшить отказы узлов трения в период эксплуатации, а также повысить их ресурс. На основании проведенных исследований создано руководство по ускоренной обкатке двигателей РД.10, согласованное с ГОСНИТИ, НИАТ, Росагропромстандарт, Росагрореммаш и утверждено Министерством сельского хозяйства.

Освоена технология повышения износостойкости манжетных уплотнений картофелеуборочной техники, сущность которой состоит в том, что поверхность вала подвергается ФАБО, а на поверхность резинового уплотнения наносится металлосодержащая композиция, включающая дисперсную медь или ее окислы. Специфика задачи заключалась в надежном фиксировании дисперсных частиц меди на поверхности материала уплотнения, сформированного на основе бутиленнитрильного каучука.

Стендовые испытания при смазывании трансмиссионным маслом манжетных уплотнений показали положительные результаты. Пусковой момент трения уменьшился в 3 раза, а износ за 150 ч испытаний снизился в 2,9 раз, при этом утечки масла через уплотнение уменьшились в 2,6 раза.

4.1.9. Червячные глобоидные и цилиндрические передачи

Глобоидная передача компактнее червячной и допускает большую перегрузку. В зацеплении этой передачи трение скольжения намного больше, а КПД ее меньше, чем в цилиндрической передаче. Использование здесь эффекта безызносности представляет значительный интерес в части повышения КПД, снижения времени приработки и повышения ресурса.

Проведенные В.П. Волковым экспериментальные работы по редукторам с глобоидными передачами в значительной степени снизили время приработки редукторов (в 2-3 раза), повысили КПД с 0,6 до 0,75 и уменьшили интенсивность износа. К сожалению выявленные возможности повышения качества глобоидных редукторов, используемых в лифтах, шахтах угольной промышленности, металлообрабатывающих станках и самолетостроении, пока не реализованы.

В цилиндрических крупногабаритных редукторах московского метро в течение нескольких лет используется металлоплакирующая присадка в смазочном масле, реализующая эффект безызносности. Присадка разработана и изготавливается О.В. Чекулаевым.

4.1.10. Буровое оборудование

Одним из наиболее ответственных элементов нефтепроводного транспорта является насос. От его работоспособности в первую очередь зависит непрерывная и своевременная подача нефти потребителю. На магистральных нефтепроводах агрегаты имеют единичную подачу до 2,5 тыс. м³. Современные нефтеперекачивающие станции – сложное энергетическое сооружение с установленной мощностью до 32 тыс. кВт. В связи с этим предъявляются жесткие требования к герметичности насосов, их взрыво- и пожаробезопасности.

Узлы трения бурового и нефтепромыслового оборудования, такие как турбобуры, насосы внутрипромысловой перекачки нефти и насосы поддержания пластового давления работают в очень тяжелых условиях, когда смазкой трущихся деталей служат рабочие среды, многие из которых содержат механические примеси или являются химически активными. Выполнение таких узлов трения с герметической масляной ванной либо практически невозможно, либо сложно и дорого.

Для обеспечения необходимого срока службы ответственных и тяжело нагруженных узлов трения бурового оборудования применение обычных термических и других известных технологических методов оказалось недостаточным. Необходимо было разработать материалы с высокой износостойкостью и способностью работать в рабочих средах с примесью абразива и воды. Наибольший интерес в этом отношении представляют композиционные материалы, что объясняется возможностью широкого

регулирования их свойств путем создания композиций с лучшими качествами составляющих их компонентов. Пара трения из таких материалов сочетает в себе одновременно антифрикционные свойства, высокую износостойкость и прочность.

Изготовление деталей из износостойких композиционных и других твердых материалов затруднено – они плохо поддаются механической обработке. Более простой способ получения комбинированной детали (по принципу взаимного дополнения качества), изнашивающая часть, которой выполняется из композиционного материала с заданными размерами, а остальная часть из стали. Анализируя вышеприведенные доводы, разработан новый износостойкий материал ТМ-1, работающий в режиме ИП. Срок службы пар трения, изготовленных из сталей с различной термообработкой в сочетании с бронзами или углеродистыми, при содержании в нефти 0,05% механических примесей составляет 1500...2000 ч. При повышении содержания механических примесей в нефти в период очистки нефтепроводов и резервуаров срок службы пар трения сокращается до 100...200 ч. Износ узлов гидравлической разгрузки (диск и подушка) многоступенчатых секционных центробежных насосов составляет 3... 5 мм. На насосах типа ЦНС за межремонтный период изнашивается 2...6 комплектов разгрузочных устройств, детали которых изготовлены из стали 20Х13.

Созданный материал ТМ-1 в первую очередь был применен для повышения срока службы мощных насосов трубопроводного транспорта и насосов закачки воды в нефтяной пласт. Материал получают путем спекания смеси разнозернистых порошков карбидов вольфрама и кобальта с одновременной их пропиткой медно-никелевыми сплавами в водородной среде. Кобальт и никель обеспечивают прочное сцепление зерен карбидов вольфрама вследствие хорошей растворимости вольфрама в этих металлах. Медь, рассеянная по микропорам сплава, в условиях трения создает предпосылки для возникновения ИП при работе пар трения в нефти и воде.

Сплав ТМ-1 по сплаву ТМ-1 может работать в среде, загрязненной абразивом. Высокая твердость и антифрикционность пары трения обеспечивает работу уплотнения без остановки насоса более 10000 ч, что в 4...5 раз превышает долговечность уплотнений с парами трения сталь по углеродистому.

Большой интерес представляет пара трения ТМ-1 по бронзе БрОЦС5- 5-5 при работе на дизельном топливе. Пара работает в режиме ИП. Пленка меди в процессе трения образуется на контактных поверхностях как на бронзовом, так и на твердосплавном кольцах, обуславливая низкий коэффициент трения (0,05...0,07) и высокую нагрузочную способность сочленения.

4.1.11. Нефтепромысловое оборудование

Одним из средств повышения износостойкости механизмов нефтепромыслового оборудования явилось использование смазочных

материалов с противоизносными свойствами. При бурении в основном применяют два вида смазочных материалов: традиционные смазочные материалы и промывочные растворы, которые наряду с основными функциями выполняют роль смазывающей и охлаждающей жидкости. При проходке мощных солевых отложений готовят промывочные жидкости на основе высококонцентрированных растворов солей, а также глинистые высокоминерализованные буровые растворы.

В Российском государственном университете нефти и газа им. И.М. Губкина были проведены научно-исследовательские работы по созданию новых буровых растворов, реализующих ИП при трении.

Допускают возможность использования эффекта ИП для самопроизвольного формирования контактных поверхностей в глобоидном зацеплении.

При точечном контакте образующаяся тонкая медная пленка легко уносится из зоны контакта стальным червяком, что способствует более быстрому формированию пятна контакта в зацеплении.

В режиме ИП было испытано восемь редукторов различных модификаций. Во всех испытаниях за 45 мин первоначальной приработки в режиме ИП значения КПД редукторов превышали паспортные показатели, которые в обычных условиях достигаются за 80...100 ч работы. Установлено, что ИП начинается через 2...3 мин после нагружения и переходит в установившийся режим через 10...15 мин; на этот же промежуток времени в основном приходится большая часть прироста КПД. Пятно контакта распространяется на 35...40 % поверхности зуба. Износ составляет 0,02...0,003 мм.

Быстрая приработка колеса и червяка объясняется тем, что при контактном нагружении образующаяся медная пленка легко выдавливается и, кроме того, некоторая ее часть переходит на червяк при пластифицирующем действии поверхностно-активных веществ.

Отметим, что эксперименты на заводе «Красная гвардия» проводились в конце шестидесятых годов, в то время еще не были разработаны высокоэффективные металлоплакирующие присадки к маслам, которые бы могли быть применены при эксплуатации редукторов.

В настоящее время разработана металлоплакирующая присадка к смазочным маслам, реализующая эффект ИП. Присадка применяется в тяжелонагруженных крупногабаритных редукторах метро г. Москвы.

4.1.12. Машины литейного производства

Трущиеся детали литейного производства работают в тяжелых условиях: высокие температуры, ударное воздействие, агрессивные и абразивные среды.

Основными видами изнашивания трущихся деталей являются: абразивный, схватывание и изнашивание вследствие пластической деформации. Все это определяет малый срок службы деталей (для многих не более года).

Длительное время большие трудности доставляла пара ось – втулка рычажного механизма машин для литья под давлением. Нагрузки в этой паре трения достигают более 49 МПа. Изношенные детали восстанавливали ацетиленокислородной наплавкой. Такой способ неэкономичен, так как наплавленный слой толщиной 5...6 мм затем обрабатывался до толщины 1 мм.

На заводе Сиблитмаш разработан способ создания биметаллических деталей с антифрикционным слоем методом сварки взрывом. Был создан участок для производства подшипников скольжения, которые имели свойство работать в режиме ИП. Новые методы формирования рабочих поверхностей деталей, работающих на износ, могут быть применены для шатунно-поршневой группы, червячных передач и др. В качестве антифрикционного слоя применяли латунь Л63 (основной металл – углеродистая сталь).

Износостойкость биметаллических деталей, изготовленных сваркой взрывом, по сравнению с традиционной технологией литья подшипников из бронзы, увеличилась в 2...4 раза при уменьшении расхода цветных металлов в 20... 100 раз; трудозатраты снизились на 20...50 %.

В заключение поясним, каким образом образуется сервоитная пленка на трущихся поверхностях в паре сталь – латунь. При высоких температурах может произойти обесцинкование латуни. Это один из факторов возможного образования сервоитной пленки. Кроме того, высокие нагрузки и агрессивность среды способствуют растворению медно-цинкового сплава в зоне контакта. После образования сервоитного слоя поверхности трущихся деталей пассивируются и наступает режим ИП.

Приведенные данные свидетельствуют о больших возможностях применения ИП в узлах трения машин литейного производства. Оказалось, что при использовании в качестве

Использование присадки МКФ-18У позволило сократить время приработки в 2 раза, снизить среднюю шероховатость поверхности в пятне контакта R_z от 42 до 5,1 мкм, минимальную шероховатость – от 35,8 до 1,4 мкм. Способ приработки был внедрен в ОАО "Уралмаш".

4.1.13. Безразборное восстановление плунжерных пар топливных насосов двигателей сельскохозяйственной техники

Данная работа была выполнена канд. техн. наук А.Ю. Кривашиным под руководством проф. Ю.Н. Ломоносова в Челябинском Агроинженерном университете в 1992 г. Автором была разработана и изготовлена установка для восстановления работоспособности плунжерных пар.

Схема установки показана на рис. 4.1.

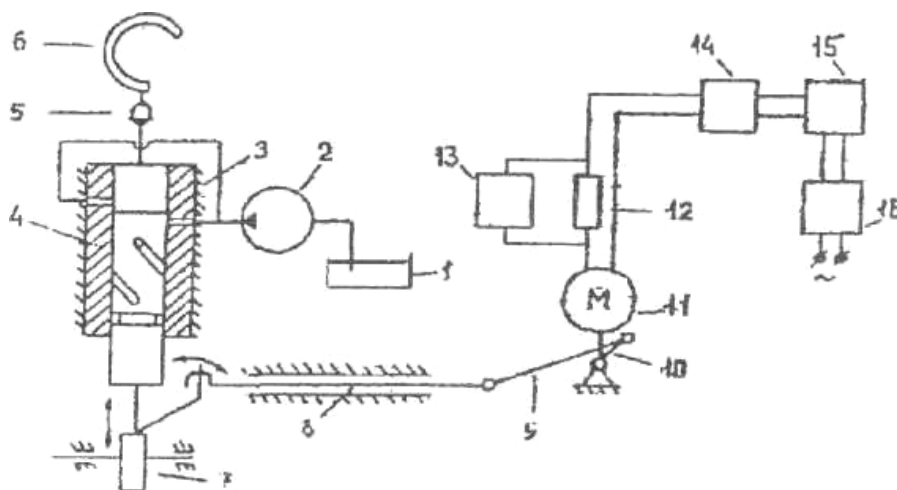


Рис. 4.1. Схема установки для безразборного восстановления работоспособности плунжерных пар топливных насосов дизельных двигателей

Установка работает следующим образом. Кулачковый вал 7 приводится во вращение от приводного вала стенда "Мотор-вал НЦ-104". При этом подкачивающий насос 2 подает из емкости 1 металлсодержащую рабочую среду в головку топливного насоса высокого давления (ТНВД) к плунжерной паре 3, 4. Плунжер 4 приводится в возвратно-поступательное движение от кулачкового вала 7 и создает давление среды в надплунжерном пространстве, которое передается через нагнетательный клапан 5 к трубке Бурдона 6, где и аккумулируется. Одновременно плунжер 4 через кривошип 10, шатун 9, рейку 8 от двигателя 11 приводится в возвратно-вращательное движение. Мощность, расходуемая двигателем на привод плунжера 4 в возвратно-вращательное движение, определяется в результате регистрации падения напряжения на шунтовом сопротивлении 12 вольтметром 13 и напряжения на блоке питания 15 вольтметром 14.

Для восстановления работоспособности плунжерных пар ТНВД топливный насос устанавливают на топливный стенд. Соединяют секции с изношенными плунжерными парами трубопроводами высокого давления через коллектор с манометром. Секции насоса с плунжерными парами, не требующими восстановления, подсоединяют для слива циркулирующей рабочей среды к емкости, которую наполняют рабочей средой для нанесения покрытий и к ней подсоединяют подкачивающий насос ТНВД, подающий среду в головку ТНВД к плунжерным парам.

Устанавливают на регулятор ТНВД привод рейки. Включают основной двигатель стенда и устанавливают частоту вращения вала ТНВД в пределах 80...100 мм-1. Подбирают необходимую величину подачи для секций насоса по развиваемому давлению в плунжерном пространстве, изменяя длину шатуна – привода рейки ТН. Включают двигатель привода рейки и устанавливают

частоту вращения вала в диапазоне 600...1400 мин-1. Манометром контролируют давление в надплунжерном пространстве. При увеличении потребления тока двигателем привода рейки процесс прекращают. Производят демонтаж манометра и трубопроводов высокого давления. Для промывки полостей головки насоса подкачивающий насос ТНВД и секции подключают к емкости с промывочной топливно-масляной смесью. По окончании очистки, определяемом по отсутствию частиц алюминия в промывочной жидкости, ТНВД подключают к системе топливного стенда и выполняют регулировочные операции согласно ГОСТ 20793-81.

Топливные насосы тракторных двигателей проверяют и, при необходимости, регулируют при каждом третьем техническом обслуживании трактора. Автор разработанного метода восстановления изношенных плунжерных пар А.Ю. Кривашин рекомендует применять метод при ТО-3, что позволит в 2 раза увеличить ресурс топливных насосов и тем самым сократить потребность в ремонте.

Для получения качественного покрытия на изношенных местах прецизионной пары при ее восстановлении рекомендуется использовать среду следующего состава % мас.:

| | |
|--|------------|
| Аммоний медь хлористый (ТУ 6-09-4491-77) | 2,1 |
| Сульфат никеля (ГОСТ 4456-74) | 0,5 |
| Глюкоза (ГОСТ 8039-74) | 3,0 |
| Алюминиевый порошок (ГОСТ 10096-76) | 1,0 |
| Глицерин (ГОСТ 6259-75) | Остальное. |

Эксплуатационные испытания разработанного метода восстановления плунжерных пар топливных насосов тракторов проводились на одном из предприятий Курганской области.

4.1.14. Безразборное восстановление тяжелого пресса

На Рязанском заводе автоагрегатов при капитальном ремонте тяжелого пресса УС-6300 ТС горячей штамповки коленчатых валов с заменой подшипников скольжения главного вала пресса (подшипники подвергались расточке и последующему шабрению) выяснилось, что мощности двигателя не хватало, чтобы повернуть вхолостую коленчатый вал пресса. Попытка приработать коленчатый вал к подшипникам путем проворачивания его механическим путем не привела к положительным результатам. Возникла необходимость разобрать пресс, шабрить подшипники, собирать пресс и производить приработку пресса.

Специалисты АвтоВАЗа Г.А. Истомин и И.Н. Чадов согласились ввести пресс в рабочее состояние без его разборки и провести его приработку за три дня. Обычно приработка прессы после капитального ремонта длится около 10 дней. Смазывание узлов трения прессы производится масляной системой с пластичными смазочными материалами. Ученые ввели в масляную систему свой металлоплакирующий материал, провернули несколько раз механическим путем главный вал прессы и пресс запустился от штатного электродвигателя. Далее на этом же масле пресс проработал с ускоренным нагружением три дня и был запущен в эксплуатацию. В дальнейшем Г.А. Истомин и И.Н. Чадов провели аналогичные работы на прессе УС-2500 ТС, обрешном стане УС 1000 ТС, стане поперечно-винтовой прокатки фирмы «Рекрол» и др. в кузнечном корпусе завода ЗИЛ. По мнению главного инженера завода ЗИЛ С.М. Степашкина, работы дали положительный эффект по сокращению сроков ремонта и обкатки уникального оборудования и снижению расхода смазочных материалов при эксплуатации.

4.1.15. Применение избирательного переноса в подшипниках скольжения, работающих в воде

Фирмой "Швицке Металл" (ФРГ) разработан новый самосмазывающийся подшипниковый материал, получивший название пермаглит. Подшипники из такого материала применяют в подводном оборудовании, атомных реакторах, турбинах. Подшипник из материала пермаглит показан на рис. 4.2 и 4.3.

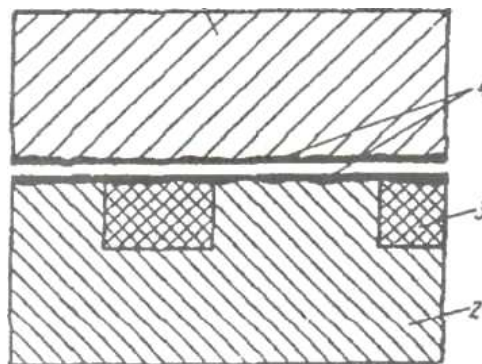
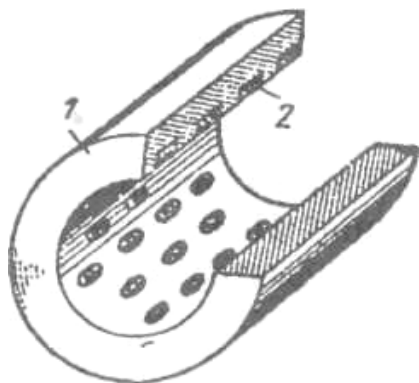


Рис. 4.2. Подшипник из пермаглита. Рис. 4.3. Самовосстанавливающаяся пленка.

Они предназначены для тяжелых условий работы в среде воды без применения каких-либо жидких или пластичных смазок при нагрузках до 147 МПа и скоростях скольжения 0,001...1,5 м/с. Допускаемая удельная нагрузка снижается с увеличением скорости и при $v = 0,2$ м/с составляет 10 МПа.

Основой материала служат различные медные сплавы, содержащие олово, свинец, никель, цинк или алюминий. На основе выполнены карманы, которые заполняются сухой смазкой, являющейся смесью различных прессованных порошкообразных материалов. Область применения материала зависит от вставок, в состав которых входят различные компоненты. Основным компонентом вставок при трении материала в воде является графит. В качестве

связующего используют пластичные металлы с добавками органических веществ. Отмечается, что размер, форма и количество полостей зависят от конструкции и условий эксплуатации узла трения.

Коррозионная стойкость пермаглида соответствует стойкости медных сплавов в пресной и морской воде. Между металлическим корпусом и материалом твердой вставки не возникает разности электрохимических потенциалов. Подшипники устойчивы против коррозии и загрязнений, устойчивы к ударам, хорошо демпфируют вибрации, имеют низкий коэффициент трения (0,1), который сохраняется при пуске и обеспечивает плавность вращения вала при работе узла трения. Отмечается, что в процессе трения образуется тонкая самовосстанавливающаяся и гладкая пленка, обладающая высокими антифрикционными свойствами.

Эта пленка прочно сцепляется с металлической основой. В результате образования пленки соприкосновения контактируемых деталей не происходит, создается надежный разделительный слой. Установлено, что аналогичный материал отечественного производства работает в режиме ИП.

4.1.16. Работы профессора Г. Польцера

В Германии известным специалистом в области трения, износа и смазки в машинах и, в частности эффекта ИП, является д.т.н., проф. Готлиб Польцер. В опубликованной им совместно с д.т.н., проф. Ф. Майснером и переведенной на русский язык книге "Основы трения и изнашивания" (М: Машиностроение, 1984. 263 с.) глава 17 посвящена эффекту ИП. В ней, помимо основных положений этого явления, рассмотрены процессы, протекающие при ИП, условия реализации ИП и использование ИП в технике. В главе подробно описаны процессы, происходящие при трении пары сталь – бронза в среде глицерина. Указано действие эффекта Киркиндаля и трибоактивация поверхности, образование квазижидких граничных пленок и металлоорганических соединений и их распад в процессе трения. Много внимания уделено условиям реализации ИП. Рассмотрены такие вопросы, как основные требования к фрикционному соединению, возможные варианты реализации. Уделено внимание новому технологическому процессу – ФАБО стальных и чугунных поверхностей трущихся деталей.

Проф. Г. Польцером и его учениками разработаны и сконструированы несколько приспособлений и станок-полуавтомат по ФАБО цилиндров автомобильных двигателей, которые вот уже более 10 лет используются на одном из ремонтных предприятий Германии.

Результатами научных исследований проф. Г. Польцера и его учеников являются выявленные высокие антифрикционные свойства латунных покрытий, полученные фрикционным способом. Причем эти свойства сохраняются и после того, как покрытие будет полностью изношено. Следствием этого является следующее:

- при латунировании стальная и чугунная поверхности упрочняются на глубину до 80 мкм;
- при высоких нагрузках латунирование одной из стальных поверхностей снижает температуру и коэффициент трения не менее чем в 2 раза;
- оптимальный подбор технологической жидкости при латунировании цилиндров двигателей позволяет сразу получить сервовитную пленку из меди. Это свидетельствует о том, что процесс ФАБО относится к технологиям, реализующим ИП при трении;
- ФАБО цилиндров двигателя при оптимальных режимах его работы может снизить удельный расход топлива до 3 %;
- латунирование гильз цилиндров снижает наводороживание поверхности трения цилиндров.

На основании проведенных обширных лабораторных исследований фрикционного латунирования деталей и стендовых испытаний автомобильных двигателей проф. Г. Польцер пришел к выводу, что ФАБО в парах трения машин и оборудования может заменять дорогостоящие и достаточно вредные для природной среды способы нанесения покрытий, предназначенные для уменьшения трения и износа. К таким покрытиям он относит: фосфатирование, обработку перегретым паром, азотирование, гальванические покрытия из меди и др.

От ФАБО может быть получен следующий экономический эффект:

- снижение износа до 40 % в смазанных парах трения из стали и большая производительность в результате более высокого КПД;
- устранение склонности к схватыванию;
- применение этого способа в процессе приработки;
- экономия энергии вследствие уменьшения трения.

Таким образом, отметим следующие области применения ФАБО:

1. Пары трения из стали (особенно из высококачественной) и чугуна;
2. Детали цилиндрической и плоской формы или в форме вала или тела вращения;
3. При смазывании пары трения с большинством смазочных материалов, а также при смазке водой, кислотами, щелочами;
4. Особенно пригоден способ при высокой склонности к схватыванию и небольшом действии абразива в зоне трения;
5. В целях предотвращения окисления при трении;
6. Для повышения предела усталости деталей из стали и чугуна.

4.1.17. Работы профессора Р. Марчака

В Польше известным специалистом в области трения, износа и смазки в машинах является д-р техн. наук, проф. Ришард Марчак. Проф. Р. Марчак много внимания уделяет исследованиям механизма ИП и водородного изнашивания металлов. В Польше им было организовано несколько научных семинаров и были изданы труды "Проблемы безыносного трения в машинах". Проф. Р. Марчаком выполнен ряд научно-исследовательских работ по международному сотрудничеству между Институтом прецизионной механики (Польша), Институтом машиноведения РАН и Общественным научно-техническим объединением по ИП и самоорганизующимся системам при трении (Россия) по реализации проекта "Современные методы, обеспечивающие безыносное трение узлов скольжения". Проект направлен на создание и использование в промышленности новых технологий и материалов, обеспечивающих эффект безыносного трения: повышение ресурса машин, снижение расхода смазочных материалов и топлива, сокращение вредных выбросов при эксплуатации двигателей, повышение стойкости металлорежущего инструмента.

При исследовании ИП Р. Марчак справедливо ставит вопрос о необходимости отдельного изучения роли хемосорбции и воздействия активной среды на поверхностный слой металла. При этом он считает необходимым использовать термодинамическое правило противодействия, которое формулируется как принцип Ле Шателье: "Если система, находящаяся в равновесии, подвергается новому воздействию извне, то в системе возникают изменения, которые уменьшают действие этого изменения, приводя к новому равновесному состоянию, по возможности незначительно отличающемуся от исходного состояния".

Этот принцип больше относится к явлениям хемосорбции, что в условиях протекания ИП приводит к образованию на поверхностях трения дополнительного защитного хемосорбционного слоя из металлоорганических соединений. Активность действия среды на поверхностный слой металла проф. Р. Марчак видит в проявлении эффекта Ребиндера. По этому вопросу он считает необходимым выяснить влияние вида напряжений и плотности дислокаций на эффективность воздействия окружающей среды. Последующие работы подтвердили тот факт, что в зависимости от вида трения (возвратно-поступательное или вращательное) эффект ИП в первом случае более активно.

Для исследования физико-химических процессов, протекающих в зоне фрикционного контакта, проф. Р. Марчаком была сконструирована и изготовлена установка с электронной аппаратурой по определению коэффициента трения и износа (рис. 4.4).

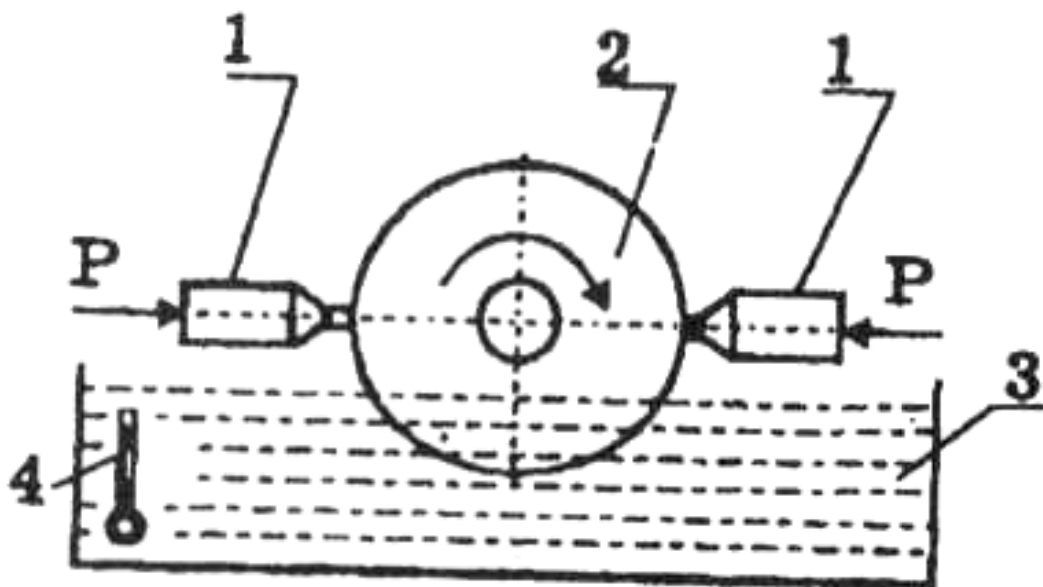


Рис. 4.4. Схема установки для исследования коэффициента трения и износа на машине МТ-1:

1 – образцы; 2 – контртело; 3 – масляная ванна; 4 – термометр

Р. Марчак совместно с А.С. Кужаровым, А.С. Гузиком и Е.Г. Задо-щенко провели на данной установке детальное исследование зависимости трибологических свойств в системах латунь – глицерин – сталь и бронза – глицерин – сталь от времени при неизменных внешних условиях (рис. 4.5). Установлено, что переход в режим безыносного трения происходит в течение длительного времени. Сам режим безыносности в том случае, если он реализуется, характеризуется коэффициентом трения менее 0,001 и практически нулевым износом пары трения.

Анализ полученных данных позволяет выявить особенности перехода исследуемых систем из режима приработки в установившийся режим трения. После приработки систем трения наблюдается падение на порядок интенсивности износа. Непрерывные ее изменения проявляются в колебаниях с небольшой амплитудой вблизи нулевого значения, что связано, по мнению авторов, с массопереносом в условиях самоорганизации.

Влияние температуры, скорости относительного скольжения, нагрузки на трибологические характеристики исследуемых трущихся материалов при смазке глицерином в дальнейшем подробно были изучены в работе Е.Г. Задощенко. Интересные результаты были получены Р. Марчаком на созданной установке по оценке влияния приработки при смазывании маслом с активными добавками.

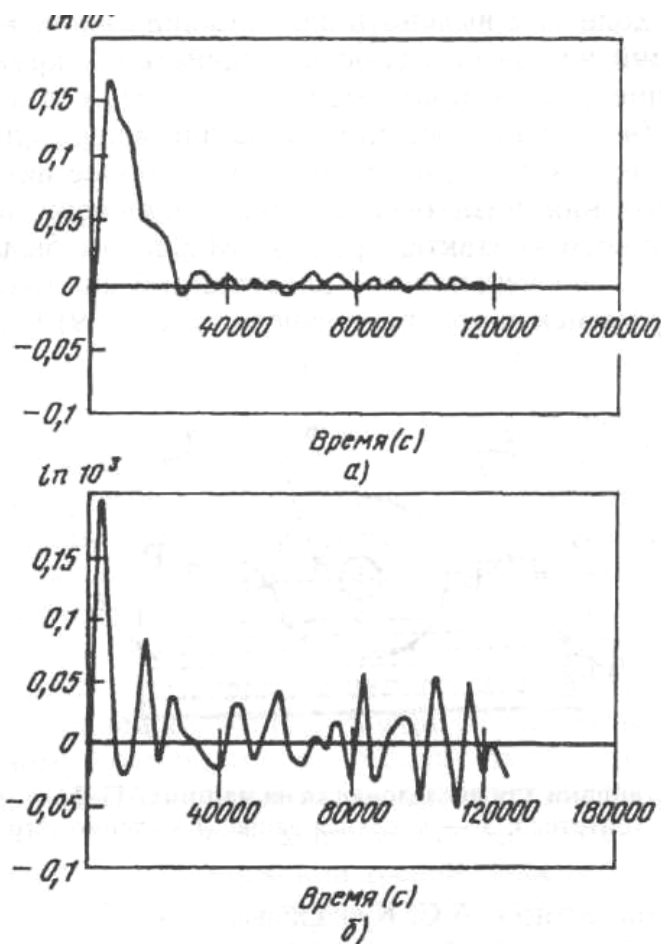


Рис. 4.5. Зависимость интенсивности износа от времени для систем латунь – глицерин – сталь (а) и бронза – глицерин – сталь (б)

Испытанию подвергалась пара трения из стали Ст4 при смазывании чистым маслом, маслом с активными добавками, а также маслом с активными добавками, но после приработки. Результаты испытаний в координатах скорость – нагрузка приведены на рис. 4.6.

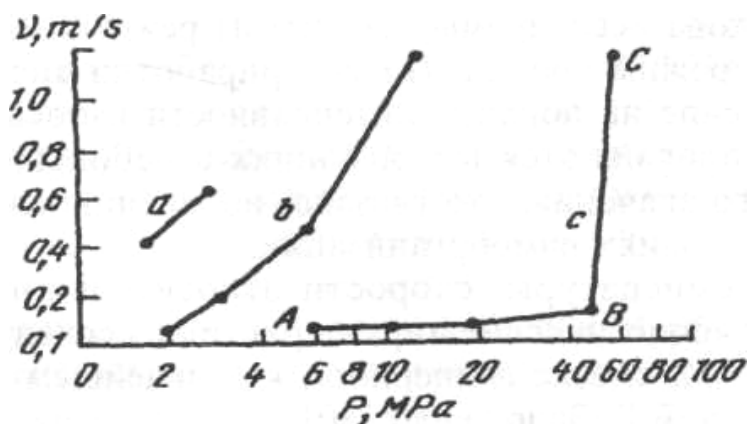


Рис. 4.6. Трибологические характеристики пары сталь – сталь:

a – чистое масло; *б* – масло с активными добавками; *с* – масло с активными добавками после приработки

Из приведенных результатов следует вывод, что активная присадка значительно расширяет границы применения трущейся пары сталь – сталь (кривые *a* и *b* в сравнении), а в случае предварительной приработки эти границы еще более расширяются (кривая *c*). Анализ приведенных результатов позволяет объяснить причины значительного последствия ФАБО на износостойкость цилиндров двигателей внутреннего сгорания, шарнирно-болтовых соединений, колес железнодорожного транспорта и других узлов трения. Высокое качество приработки после ФАБО создает трущемуся соединению высокую износостойкость при последующей его работе.

4.2. Материалы, реализующие избирательный перенос при трении

4.2.1. Конструкционные материалы

Медистый серый чугун, работающий в режиме ИП разработан и изучен в Ивановском государственном техническом университете. Он может работать в осевых и радиальных подшипниках скольжения, червячных, винтовых и других передачах с односторонним, реверсивным и пульсирующим движением. Смазывание узлов трения может осуществляться как жидкими, так и пластичными смазочными материалами.

Для работы в паре с медистым чугуном используют легированные и углеродистые стали после термической или химико-термической обработки. Твердость поверхности трения стальной детали должна быть выше твердости чугуна не менее чем на 100 НВ.

Предельные значения давлений при замене в узлах трения обычных марок серого чугуна на медистый и при реализации ИП повышаются в 1,5...2 раза и могут достигать 15...20 МПа.

Основное влияние на характеристики трения и изнашивание медистого чугуна в режиме ИП оказывает содержание меди в чугуне. Интенсивность изнашивания J (и коэффициент трения f) при испытании на изнашивание чугунов в паре со сталью при смазывании глицерином (скорость скольжения – 0,55 м/с) имели следующие значения:

| Содержание меди в чугуне, % | 0 | 2 | 4 | 7 | 10 |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| J | 1.2 | 0.04 | 0.008 | 0 | 0 |
| f | 0.086 | 0.081 | 0.059 | 0.033 | 0.028 |

Углерод и марганец в составе серого медистого чугуна на характеристики трения и изнашивания оказывают положительное влияние, а кремний препятствует реализации ИП.

Наилучшее сочетание свойств серого медистого чугуна и характеристик трения и изнашивания в режиме ИП наблюдается при перлитной металлической основе. Наличие в структуре феррита резко снижает

нагрузочную способность, а структурно свободный цементит и ледебурит ухудшают обрабатываемость деталей резанием и вызывают усиленное изнашивание стального контртела.

Содержание меди в чугунах не выше предела растворимости в жидком растворе (4...7%) способствует первичной и тормозит вторичную стадию графитизации. Поэтому металлическая основа медистого чугуна с обычным для серых чугунов содержанием других элементов при литье в песчаные формы получается в основном перлитной. При содержании меди 4 % в структуре чугуна обнаруживаются округлые включения высокомедистой фазы. При содержании меди более 7 % в структуре появляются структурно свободный цементит и ледебурит и может проявляться ликвация высокомедистой фазы.

Учитывая влияние рассмотренных элементов на характеристики трения и изнашивания серых чугунов, их графитизирующую способность и условия получения перлитной металлической основы без заметной ликвации высокомедистой фазы, для протекания ИП в узлах трения чугунов – сталь рекомендуется следующий состав серого медистого чугуна: 3,2... 3,6 % С; 1,0... 1,8 % Si; до 0,8 % Mn; 4...7 % Cu.

Основным условием реализации эффекта ИП в парах трения медистый чугун – сталь является применение смазочных материалов, препятствующих окислению поверхностей трения типа ЦИАТИМ-201, ЦИАТИМ-203 и др. При использовании смазочных материалов общего назначения эффект ИП реализуется путем ввода в их состав поверхностно-активных веществ.

В индустриальные масла общего назначения можно добавить 0,75...1,0 % стеаратов металлов, а в пластичные смазочные материалы общего назначения (солидолы) можно ввести антиокислительную присадку – дифениламин в количестве 0,35...0,7 %.

Механические свойства медистого чугуна при перлитной металлической основе соответствуют серому чугуну СЧ 21.

Антифрикционный самосмазывающийся материал «Афтал». Материал представляет собой многослойную волокнистую структуру, состоящую из различного сочетания по слоям политетрафторэтиленовых, стеклянных, арамидных, металлических и других нитей, заключенных в металлическую матрицу.

В зависимости от назначения и условий эксплуатации материал выпускается в виде листа толщиной 0,5... 0,8 мм в нескольких модификациях.

Особенности структуры материала позволяют различать рабочую и нерабочую стороны листа. Нерабочая сторона листа представляет собой 100% связующего металла, что позволяет наносить материалы в виде покрытия на металлические поверхности различной формы методом пайки.

Покрытие может быть образовано на стальной подложке непосредственно в процессе получения материалов.

Подшипники из материала «Афтал» имеют следующие эксплуатационные характеристики при работе без смазки:

| | |
|--|--------------------------|
| Температурный интервал эксплуатации, К | 13...523 |
| Максимальная удельная нагрузка, МПа | 400 |
| Максимальная скорость скольжения, м/с | 1,0 |
| Коэффициент трения | 0,02...0,2 |
| Допускаемый режим эксплуатации [P·v] , МПа·м/с | 6,1 |
| Износостойкость | $10^{-9} \dots 10^{-10}$ |

Материал способен работать в вакууме, в агрессивных и инертных средах. Основной особенностью материала является то, что в качестве металлической матрицы может быть использована медь или сплавы меди с оловом и свинцом.

При этом материал может быть получен с остаточной пористостью 20%. В этом случае детали с покрытием перед их установкой в узел трения пропитывают маслом, что позволяет обеспечить реализацию ИП в процессе эксплуатации и длительное время поддерживать этот режим за счет подпитки смазочной жидкостью, содержащейся в порах материала. При этом коэффициент трения снижается на порядок, а допускаемая скорость скольжения может быть увеличена.

Материал «Афтал» обладает свойствами как полимеров – сравнительно небольшим удельным весом, эластичностью, так и свойствами, присущими металлам – высокой электропроводностью и теплопроводностью.

Наиболее эффективно применять «Афтал» в виде покрытия на металлических поверхностях различной формы. Важным достоинством является то, что покрытие можно наносить на самые различные металлы и сплавы: сталь, алюминиевые сплавы, титановые сплавы и др.

В качестве контртела в подшипниках скольжения желательно использовать стальной вал, закаленный до твердости не ниже 45 HRC с параметром шероховатости $Ra = 0,2 \dots 0,4$ мкм.

Рекомендуемый диаметральный зазор равен 0,004...0,01 от диаметра вала. Применение валов с хромовым и никелевым покрытием увеличивает ресурс работы узлов трения.

В слабонагруженных узлах трения материал используется в виде листа, из которого изготавливают свертные втулки и другие детали, которые могут быть

закреплены в посадочные отверстия развальцовкой или клеены эпоксидными и фенолформальдегидными клеями.

Во всех случаях должны быть обеспечены посадочные размеры без применения механической обработки материала.

Порошковый железо-медно-стеклянный материал (ЖМСМ). Для узлов трения, смазываемых технологическими средами, был разработан металлостеклянный материал ЖГрЗСт7ДЗ (А.с. № 68492, СССР) с высокими антифрикционными свойствами.

В состав этого материала была введена медь путем химического восстановления ее на частицах порошка из стекла. Оптимальное количество меди было 3 % мас.

В процессе изнашивания железо-медно-стеклянного материала в растворах щелочей на поверхностях трения стали и самом материале образуется медьсодержащая пленка.

Коэффициент трения при этом становился в пределах 0,001...0,0015 и износ материала трудно фиксировался (0,08...0,12)·10⁻¹⁰. Профилографирование поверхностей трения и избирательное вытравливание подтвердило содержание меди в пленке.

В реализации режима ИП важная роль принадлежит стеклу, которое входит в состав материала. При трении в аналогичных условиях порошкового железомедного материала снижение коэффициента трения не наблюдается.

Щелочи действуют на стекло во много раз интенсивнее, чем кислоты. Предполагается что в результате механохимических процессов стекло, входящее в состав порошкового материала, растворяется в щелочной среде, образуя в зоне контакта коллоидный раствор в виде золя кремниевой кислоты.

Поскольку коллоид обладает высокой адсорбционной способностью, ионы натрия могут быть замещены ионами меди, имеющими более высокую валентность и меньший радиус сольватированного иона. Ионы меди, образующие диффузионный слой кремнеземной мицеллы, оседают на очищенной от окисных пленок поверхности стального контртела благодаря кулоновскому и адгезионному взаимодействию.

Образующийся слой меди содержит продукты механохимических превращений в щелочной среде, он довольно прочен и эластичен и может быть удален с поверхности только механической обработкой и травлением. На порошковом материале слой меди образуется позже, он более рыхлый.

Из разработанного железо-медно-стеклянного материала были изготовлены втулки подшипников скольжения машин отбельного и отделочного цехов красильно-отделочных фабрик. Подшипниковые узлы работали в растворах едкого натра концентрации 40 г/л.

В процессе работы на поверхностях трения стального вала и железо-медно-стеклянного подшипника визуально наблюдалась тонкая медьсодержащая пленка.

С учетом допустимой величины рабочего зазора подшипникового узла и зафиксированной интенсивности изнашивания пары трения срок службы подшипников скольжения из разработанного материала составляет 5...6 лет, т.е. в 2–3 раза больше, чем обычно.

Материалы для слаботочных электрических контактов. В приборостроении широко используют скользящие контакты, работающие в условиях сухого трения под воздействием различных токовых нагрузок.

Часто к этим условиям помимо электрических параметров (таких, как постоянство переходного сопротивления, низкий температурный коэффициент электросопротивления) предъявляются требования по определенному моменту пуска. Одной из важных характеристик является высокая износостойкость материалов контактной пары.

В связи с требованиями надежного контактирования для изготовления скользящих контактов используются сплавы из благородных металлов, которые способны длительное время противостоять окислению и, следовательно, сохранять неизменным контактное сопротивление.

Практика использования благородных металлов показала, что не все материалы обладают достаточной надежностью при работе скользящих контактных пар. Подбор материалов контактных пар, как правило, производится эмпирически.

Были проведены исследования работоспособности сплавов благородных металлов на основе золота, палладия, платины и серебра. Определялись коэффициенты трения контактных пар, их износостойкость, изменение профиля поверхности при трении, влияние формы контактирующих поверхностей и т.п.

Дальнейшая работа по выбору менее дефицитных материалов для скользящих контактов показала, что явление ИП происходит и на металлокерамических сплавах на основе серебра марок ПдСрН70-5 и ПдСр70.

Явление ИП, в частности золота, обеспечивает минимальный износ скользящих слаботочных электрических контактов.

В связи с таким эффектом было предложено предварительно обрабатывать фетром с маслом ВМ-4 рабочую поверхность золотомедного сплава (ЗлХ-0,5; ЗлХ-2,8) до получения на этой поверхности тонкой пленки золота толщиной 1...1,5 мкм. В процессе работы образовавшийся слой золота переносится на щетку, размазывается по поверхности трения.

Для проверки работоспособности контактов, на которых был предварительно образован слой золота технологической полировкой фетром, были проведены сравнительные испытания. При методе обработки отжигом износ щеток составил 17,6 мкм; при полировке фетром – 4,1 мкм.

Испытания показали более высокую износостойкость обработанных фетром колец по сравнению с отожженными.

4.2.2. Присадки, композиции и смазочные материалы, реализующие эффект безызносности

Наибольшее распространение получили металлоплакирующие присадки к смазочным материалам, образующие медную и оловянную сервоитные пленки. Перечислим их:

1. Металлоплакирующая присадка МКФ-18, применяется в ряде отраслей: тяжелом машиностроении, рыболовецком флоте, станкостроении, сельскохозяйственной технике, автомобильном транспорте.
2. Смазочный материал «Атланта», изготавливается на Московском экспериментальном нефтемаслозаводе, применяется в тяжело нагруженных узлах самолетов типа Су.
3. Смазочный материал «Медя», применяется в узлах трения горнодобывающего и перерабатывающего оборудования в Казахстане.
4. МСК «Валена», применяется в узлах трения горнодобывающего и перерабатывающего оборудования в Казахстане, в тяжело нагруженных узлах трения железнодорожного транспорта.
5. Смазочный материал «Пума М» применяется для смазки пары трения «колесо-рельс». Применяется в железнодорожном транспорте.

За рубежом применяются такие металлоплакирующие присадки как:

1. «Металл-5» (Швейцария, Франция),
2. «Лубри-фильм-металл» (Италия, Франция),
3. «Слюдер 2000» (Англия),
4. «Реловер», SMT2 (США) и др.

Приведенные сравнительные испытания российских и зарубежных металлоплакирующих смазочных материалов показали, что российские СМ не уступают зарубежным, а некоторые из них превосходят.

Использование металлоплакирующих СМ позволяет повысить долговечность узлов трения (в 2–3 раза), снизить потери на трение (на 30...200%) и тем самым повысить КПД машин и оборудования, уменьшить

расход СМ (в 2–3 раза), увеличить период между смазочными работами (до 3 раз).

4.2.3. Внедрение

Информация об использовании изб ИП (безызносного трения) в машинах и оборудовании приведена в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Использование ИП (эффекта безызносности) в машинах и оборудовании

| № | Машины, оборудование | Узлы трения | Что применено | Где используется (один из примеров) | Руководители работ |
|----|--|---|--|--|--|
| 1 | Самолеты | Тяжелонагруженные узлы, шасси управления | Металлоплакирующие смазочные материалы: Атланта и др. | Конструкторское бюро им. Сухого | Дякин С.И. Шепер М.Н. Тепляшин А. В. |
| 2 | Тяжелое оборудование завода «Уралмаш», Новокраматорского машиностроительного завода, экскаваторы, редукторы, станки для бурения, металлургическое оборудование | Основные узлы трения, подшипники, зубчатые передачи | – | Предприятия нефтяной, горнорудной промышленности | Бондюгин В.М. Васильченко Н. |
| 3 | Оборудование и машины морского флота | Дизели морских судов, палубное оборудование | – | Судоверфи Мурманского Рыбфлота | Козлов Л.А. |
| 4 | Тяжелые автокраны | Поворотное устройство, ролики и направляющие | – | Ульяновский машиностроительный завод | Макаров Е.И. |
| 5 | Кузнечнопрессовое оборудование | Основные узлы трения | – | ЗИЛ | Зам. Главного механика ЗИЛа |
| 6 | Строительные и дорожные машины, экскаваторы, бульдозеры | Основные узлы трения, ковши и др. | Металлоплакирующий смазочный материал типа СМ-01 и присадка МКФ-18У | Белорусский филиал ВПТИ | Шупиков А.Е. |
| 7 | Шахтные комбайны | Зубчатое зацепление редукторов | Металлоплакирующий смазочный материал Диставик | Горловский завод редукторов | Рахутин В.С. Кобылянский С.И. Тищенко Л.С. |
| 8 | Насосы и др. оборудование магистральных нефтепроводов | Уплотнения, узлы разгрузки | Спеченый материал из карбидов вольфрама, никеля, меди | Гомельский ЦБПО «Главтранснефть» | Голуб М.В. |
| 9 | Электробуры | – | – | – | Грискин Е.Н. |
| 10 | Электродвигатели для погружных насосов | – | – | – | Грискин Е.Н. |
| 11 | Мощные турбогенераторы | – | – | – | Грискин Е.Н. |
| 12 | Герметичные аппараты при производстве сорбита | – | – | – | Грискин Е.Н. |
| 13 | Машины специального назначения | Основные узлы трения | Новые антифрикционные материалы | Воронежский политехнический институт | Гнусов Ю.В. |
| 14 | Пневмопрядильные машины типа ЛПМ-120МС | Подшипники качения | Металлоплакирующий смазочный материал СПМ-5 | Текстильный комбинат, г Баку | Денисова Н.Е. |
| 15 | Прядильные машины типа БД-200М69 | Подшипники качения и скольжения | – | Ивановский хлопчатобумажный комбинат | Денисова Н.Е. Турчков Е.В. |
| 16 | Швейное оборудование | Механизм челнока, игловодитель и др. | Металлоплакирующая присадка типа МКФ-18 | Предприятия Минбыта РСФСР | Прокопенко А.К. Денисова Н.Е. |
| 17 | Обувное оборудование | Узлы трения кривошипа, кулисы и др. | Металлоплакирующая присадка типа МКФ-18, ФАБО | – | Прокопеко Л.К. |
| 18 | Трикотажное оборудование | Направляющие кареток, вязальный механизм | – | – | Прокопенко А.К. |
| 19 | Оборудование для обработки жаропрочных материалов | Режущий инструмент | Металлоплакирующая присадка | СКТБ, г. Пенза | Чекулаев О.В. |
| 20 | Автомобили ЗИЛ, ГАЗ, КамАЗ, МАЗ и др. | Подшипники качения, скольжения, цилиндры двигателей | Металлоплакирующие смазочные материалы типа ПСМ, ФМС, присадка МКФ-18У | Пензенское и Одесское управления автотранспорта. | Быстров В.Н. Софии В.Ф. |

| | | | | | |
|----|--|---|--|---|---|
| 21 | Двигатели автомобилей КамАЗ, ЗИЛ, МАЗ и др. | Подшипники качения и скольжения, цилиндр-поршень | Металлолакирующие смазочные материалы, ФАБО | – | Быстров В.Н. Андреева А.Г. Софии В.Ф. Намаконов Б.В. |
| 22 | Двигатели тракторов Д-50, СМД-60 и др. | – //– | – | Арский РЗ Тат. АССР и др. | Ижиев Г.И. Кириллов Ю.И. Гребенюк М.И. |
| 23 | Троллейбусы «Шкода-9» | Узлы сцепляющего устройства | Металлолакирующие смазочные материалы типа ФМС | Трамвайно-троллейбусное управление, г. Рига | Кремешный В.М. Либерман Л.М. |
| 24 | Дизели тепловозов Д100 | Цилиндро-поршневое кольцо. Новая конструкция поршневого кольца с бронзовой вставкой | Металлолакирующая присадка | Оренбургский тепловозоремонтный завод, Локомотивное депо Барановичи | Асташкевич Б.М. |
| 25 | Скоростемеры локомотивов | Шестеренчатая, зубчато-реечная передачи | Металлолакирующий смазочный материал типа ПМС | Белорусская железная дорога | Бортник Г.И. |
| 26 | Манометры локомотивов | – | – | – | Бортник Г.И. |
| 27 | Тяговые электродвигатели | Подшипники качения | – | – | Дубина А.М. Бутом Е.М. |
| 28 | Подбивочные и рихтовочные машины | Подшипники качения и скольжения | – | – | Дубина А.М. Бутом Е.М. |
| 29 | Бытовые холодильники | Узлы трения, компрессоры | Металлолакирующая присадка МКФ-18Х | Саратовское электроагрегатное ПО | Куранов В.Г. |
| 30 | Горно-шахтное оборудование | Подшипники качения и скольжения шарошечных машин | Металлолакирующая смазка | Трест «Союзспецшахто-оборудование» | Мельниченко И.М. |
| 31 | Насосы фунтовые, песковые, шламовые | Манжетные уплотнения, уплотнения штоков | Композиционный полиуретан, наполненный медью | ПО «Якуталмаз» | Кольцов Л.А. |
| 32 | Карьерные экскаваторы, кузнечнопрессовое оборудование | Подшипники скольжения | Биметаллические подшипники | Новосибирское НПО «Координатор» | Мельниченко И.М. |
| 33 | Энергоустановки, работающие на водороде | Основные узлы трения | Новые антифрикционные материалы | Ленинградский механический институт | Соколов Ю.Д. Беспрозванных Л.В. |
| 34 | Лесопильные рамы типа РД-2 | – | Металлолакирующие смазочные материалы | Пермский машиностроительный завод, Гомельский государственный университет | Пинчук В.Г. |
| 35 | Оборудование по спеканию синтетических алмазов | Пресс-формы | ФАБО | Предприятие ОБ-21 /1, г. Брянск | Мельниченко И.М. |
| 36 | Химические аппараты ПМ-50-0,4/0,6 | Нижняя концевая опора | Наплавка сплавом релит-медь | Руставский ПО «Азот» | Воронков БД Шадрин В.Г. |
| 37 | Блюминг 1150 | Нажимное устройство | ФАБО, металлолакирующие смазочные материалы | Нижнетагильский металлургический завод | Быстров В.Н. |
| 38 | Технологическое оборудование | Тяжелонагруженные узлы трения | – | ПУя А-1457В-8772 | Пинчук И.Г. |
| 39 | Приборные комплексы | Слаботочные электрические контакты | Новые антифрикционные материалы | Предприятия г. Саратова | Куранов В.Т. |
| 40 | Компрессоры разных типов | Цилиндры и поршневые кольца | ФАБО | Краснодарский компрессорный завод | Суруханов Б.Б. |
| 41 | Машины трения вращательного и возвратно-поступательного движения | а) кольцо-ролик; б) колodka-ролик; в) палец-пластина (диск) | Способ испытания смазочных материалов на температурную стойкость (патент РФ 2378637) | МГТУ им. Н.Э.Баумана. | Гаркунов Д.Н. Мельников Э.Л. Бодарева А.В. |
| 42 | Железнодорожный транспорт | Рельсы, колесные пары, подшипники качения | Металлолакирующая смазка. Пума с МСК «Валена» | Московская железная дорога | Бабель В.Г. Мамыкин С.М. |
| 43 | Горно-обогатительное оборудование | Подшипники шаровых мельниц | «Литол-24» с МСК «Валена» | «Казахмыс» Джезказган, ОАО «Надежность и долговечность» | Корник П.И. |
| 44 | Металлообработывающее оборудование | Фильтры | МСК «Валена» | Кольчугинский завод | Щедрин А.В. |

Список литературы

1. Асташкевич Б.М., Булюк А. Исследование изнашивания цилиндрических втулок из чугунов, легированных медью // Эффект безызносности и триботехнологии. 1997. № 1. С. 27–32.
2. Асташкевич Б.М. Повышение сопротивления задиру и изнашиванию деталей цилиндропоршневой группы тепловозных дизелей методами избирательного переноса // Долговечность трущихся деталей машин. Вып. 1. 1996. С. 40–53.
3. Бурумкулов Ф.Х., Андреева А.Г., Кулаков А.Т. Сравнительная оценка износостойкости двигателя КамАЗ-740 // Эффект безызносности и триботехнологии. 1993. № 1. С. 51–56.
4. Быстров В.Н. Избирательный перенос при трении – новые перспективы в изготовлении и эксплуатации машин // Эффект безызносности и триботехнологии. 1992. № 2. С. 15–20.
5. Гаркунов Д.Н., Бондюгин В., Быченков В. Вопросы и ответы по триботехнике // Эффект безызносности и триботехнологии. 1992. № 1. С. 55–69.
6. Гаркунов Д.Н., Снитковский М.М., Соломко В.А. О применении избирательного переноса в узлах трения судовых механизмов и устройств // ЦБНТИ Минморфлота СССР. 1975. 31 с.
7. Голуб М. Опыт конструирования, производства и эксплуатации износостойких уплотнений валов насосов магистральных нефтепроводов // Эффект безызносности и триботехнологии. 1992. № 3–4. С. 54–63.
8. Козлов Л.К. Опыт применения избирательного переноса в узлах трения судовых машин и механизмов // Эффект безызносности и триботехнологии. 1992. № 3–4. С. 22–27.
9. Кремешный В.М., Беляков А. Технологическое обеспечение эксплуатационной надежности и ресурса узлов трения авиационной техники // Эффект безызносности и триботехнологии. 1994. №3–4. С. 10–18.
10. Кремешный В.М. Новые способы повышения износостойкости тяжелонагруженных узлов трения машин. Обзорная информация. Рига: Госплан Латвийской ССР, 1987. 48 с.
11. Кремешный В.М., Тепляшнн А. Повышение износостойкости стальных сферических шарниров // Эффект безызносности и триботехнологии. 1992. № 1. С. 18–37.
12. Машков Ю., Баранов Г., Иссерт И. Исследование и перспективы применения избирательного переноса при трении в изделиях

микрокриогенной техники // Эффект безызносности и триботехнологии. 1997. № 2. С. 60–65.

13. Мелкумян С.А. Повышение долговечности плунжерных пар насосов на основе эффекта безызносности // Эффект безызносности и триботехнологии. 1992. № 3–4. С. 47–51.
14. Суранов Г.И. Повышение долговечности деталей цилиндропоршневой группы двигателей применением избирательного переноса при трении // Эффект безызносности и триботехнологии. 1997. № 1. С. 20–26.

Глава 5. Новый метод испытаний жидких и пластичных смазочных материалов на термостойкость

Испытания смазочных материалов на термостойкость и износостойкость отличаются большим рассеянием результатов даже на лабораторных образцах, а тем более в узлах, агрегатах или машине в целом. Рассеяние обусловлено различием геометрических и механических свойств поверхностей трения в условиях их контакта, непостоянством внешних условий и другими обстоятельствами. Во многих случаях правильные выводы можно сделать только на основании испытаний большого числа однотипных объектов с использованием статистических методов обработки результатов.

Предусмотрено четыре группы испытаний (ГОСТ 23.224-86): сравнительные экспресс-испытания; моделирующие испытания; ускоренные ресурсные испытания; испытания для определения диапазона нагрузок, скоростей и температур, обеспечивающих приемлемые в эксплуатации значения интенсивности изнашивания.

Для проведения этих испытаний рекомендуются серийные машины трения: СМЦ-2, МИ-1М, СМТ-1, УМТ-1, АЕ-5, 77МТ-1, ПТХ-3, а также испытательные и имитационные установки (ГОСТ 23.224-86, 23.220-84, 23.211-80, 23.221-84, 23 208-79 23.202-78, 23.214-83). В этих же ГОСТах приведены методики определения износа материала, размеры образцов (деталей), подвергаемых испытаниям; приспособления и приборы для проведения испытаний на износ.

Термостойкость смазочных композиций в настоящее время определяется в соответствии с ГОСТ 23.221-84 и ГОСТ 9490-75 на основе четырехшариковой машины (ЧШМ).

Сущность способа испытания смазочных материалов на термостойкость на ЧШМ состоит в триботехническом испытании сопряжения с точечным или линейным контактом, образованным вращающимся с постоянной скоростью образцом и тремя (или одним) неподвижными образцами при постоянной нагрузке и ступенчатом повышении температуры образцов и окружающего их смазочного материала от внешнего источника тепла, с регистрацией момента трения во время испытаний, по изменению которого судят о температурной стойкости смазочных материалов.

Способ предусматривает шесть схем испытаний:

1. Испытания при контакте вращающегося шара с тремя неподвижными шарами;
2. Испытания при контакте вращающегося шара со сферическим пояском на пересечении торцевой поверхности внутреннего отверстия кольцевого образца;
3. Испытания при контакте вращающегося шара с тремя образцами с плоскими

- рабочими поверхностями;
4. Испытания при контакте вращающегося шара с тремя цилиндрическими роликами, равнорасположенными относительно оси вращающегося шара;
 5. Испытания при контакте вращающегося конического образца с тремя цилиндрическими образцами, равнорасположенными относительно оси вращения конического образца;
 6. Испытания при контакте вращающегося конического образца с острой кромкой внутреннего отверстия кольцевого образца.

Испытательная машина (ГОСТ 23.221-84) содержит: вертикальный шпиндель с приводом, патрон для закрепления шаров диаметрами 8 и 12,7 мм или образцов с конической поверхностью с диаметром 7,32 мм в рабочей зоне; горизонтально расположенную чашку с испытываемым смазочным материалом, имеющую оправку для закрепления образцов неподвижно; систему нагружения вращающегося шара (или конического образца); внешний источник тепла – нагреватель, обеспечивающий подъем температуры узла трения и окружающей его слоя смазочного материала в интервале температур 293...573 К и поддержание ее на заданном уровне с погрешностью не более ± 5 К; устройство для непрерывной регистрации момента трения между образцами с погрешностью не более 1 %.

Основной недостаток указанного способа состоит в том, что он дает оценку температурной стойкости смазочных материалов при нагреве их до определенной температуры от внешнего источника тепла, что, по существу, не является характеристикой термостойкости смазочного материала при трении – способности смазочного материала противостоять нагреву от внутреннего источника тепла, т. е. нагреву от действия сил трения в сопряжении в результате физико-химических процессов в зоне контакта трущихся деталей. Кроме того из-за отсутствия контактов образцов по плоскости, имитирующих подавляющее большинство сопряжений со схемой взаимодействия типа «плоскость – плоскость», не реализуются условия трения, близкие к реальным условиям, происходящим при работе пар трения механизмов и машин.

К другим недостаткам указанного способа относятся: значительная трудоемкость процедуры проведения испытаний; отсутствие учета трибофизических, трибохимических, электрических и магнитных процессов в контактных зонах образцов из-за незначительных площадей контакта сопряжений (точечных и линейных, переходящих в узкозональные продолговатые пятна контакта и узкозональные поясные полосы). Не учитывается в способе (ГОСТ 23.221-84) также снижение износа за счет применения металлоплакирующих присадок, обеспечивающих появление в узлах трения защитных сервовитных пленок мягких металлов и полимерных серфинг-пленок при возникновении режимов безыносного трения, которые препятствуют нагреву смазочных материалов в узлах трения, повышая их температурную стойкость.

Цель нового способа испытаний смазочных материалов на термостойкость – приближение контактирующих элементов образцов к типу «плоскость – плоскость» для оценки температурной стойкости смазочных материалов по нагреву их от внутреннего источника тепла (сил трения в сопряжениях образцов), а не от внешнего; снижение трудоемкости процедуры проведения испытаний; учет трибофизических, трибохимических, электрических, магнитных процессов в контактных зонах образцов; учет снижения износа образцов за счет применения металлоплакирующих присадок к смазочным материалам, обеспечивающих появление в узлах трения защитных сервовитных и серфинг-пленок, которые повышают температурную стойкость смазочных материалов.

Данная цель достигнута тем, что в известном способе (ГОСТ 23.221-84) сопряжения образцов с точечными и линейными контактами в начале испытания заменены, по крайней мере, тремя выступами с криволинейными поверхностями контакта, расположенными на неподвижной колодке, контактирующей с вращающимся роликом, а оценка термостойкости смазочного материала осуществляется по температуре саморазогрева смазочного материала в чашке при заданном времени работы сопряжения «колодка – ролик», либо по температуре и времени испытания, при которых начинается дымление испытываемого смазочного материала в зоне контакта образцов.

Устройство для испытания смазочных материалов на температурную стойкость (рис. 5.1) состоит из горизонтального шпинделя с приводом, снабженного вращающимся роликом 1, закрепленной неподвижно по отношению к ролику 1 колодки 2 с тремя (по крайней мере) выступами 3 с криволинейными поверхностями контакта, расположенными на неподвижной колодке 2 контактирующими с вращающимся роликом 1. В чашке 4, расположенной горизонтально помещается испытываемый на температурную стойкость смазочный материал 5, температура которого контролируется с помощью датчика температуры 6 и контрольного термометра 7 либо с помощью резонатора акустических колебаний 10 датчика приема этих колебаний 11, проходящих через разогретые трением колодки 2 о ролик 1. Устройство снабжено также механизмом нагружения 8 колодки 2 и механизмом для измерения момента трения 9.

Способ испытания смазочных материалов на термостойкость [6] осуществляется следующим образом. Испытываемый смазочный материал 5 помещается в чашку 4, при этом ролик 1 окунается в смазочный материал на 3...5 мм ниже оси его симметрии. Далее ролику 1 придается скорость вращения от 100 до 1500 мин⁻¹, с помощью механизма 8 осуществляется нагружение колодки 2 заданным усилием. В чашке 4 фиксируется начальная температура смазочного материала с помощью датчика температуры 6 и контрольного термометра 7 либо по скорости прохождения звуковой волны через разогретый смазочный материал с помощью резонатора 10 и датчика 11.

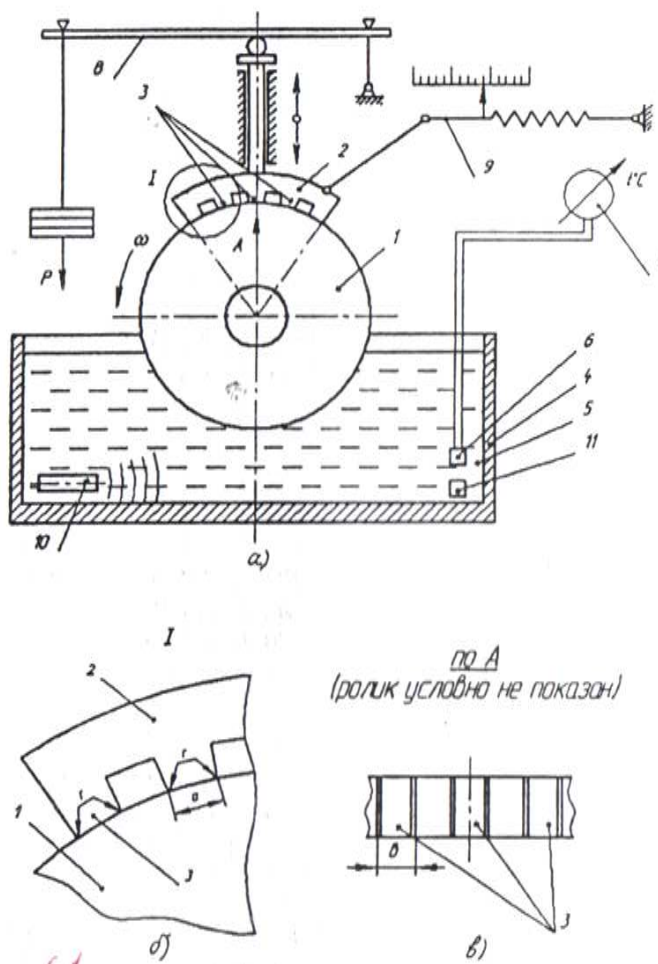


Рис. 5.1. Устройство для испытаний смазочных материалов на температурную стойкость:

а – схема устройства; б – колодки 2 с выступами 3 ; в – вид по стрелке А на выступы 3 шириной b (ролик 1 условно не показан).

Температура саморазогрева смазочного материала в чашке 4 за заданное время испытаний и характеризует температурную стойкость испытываемого смазочного материала. Зависимости изменения температуры смазочного материала 5 в чашке 4 и момента трения от времени испытания представлены на рис. 5.2, 5.3.

В случае дымления смазочного материала в зоне сопряжения образцов устройство останавливается и фиксируется время испытания и температура смазочного материала в чашке 4. Способ позволяет также сделать оценку износа образцов (выступов 3 колодки 2 в виде площадок с размерами axb и ролика 1) с помощью, например, взвешивания или микрометрии. В лабораторных условиях был опробован предлагаемый способ испытания различных смазочных материалов на температурную стойкость.

В качестве испытываемых смазочных материалов были выбраны следующие образцы (см. рис. 5.2): 1 – масло моторное + 0,2 % МСК «Валена» [7]; 2 – масло моторное +0,4 % и МСК «Валена»; 3 – масло моторное +0,6 %

МСК «Валена»; 4 – масло зарубежное моторное; 5 – масло моторное без присадки.

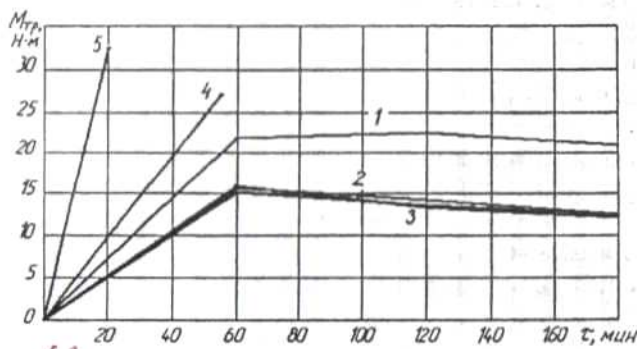


Рис. 5.2. Зависимость момента трения $M_{тр}$ от времени испытаний τ

МСК «Валена» широко применяется в узлах трения железнодорожного транспорта, горнодобывающего и перерабатывающего оборудования России, Украины, Казахстана, тяжело нагруженных узлах трения механизмов и машин.

Для испытания образцов смазочных материалов 1 – 5 использовали машину трения ИИ-5018. Образцы смазочных материалов испытывали на паре трения «стальной ролик – чугунная колодка» с тремя выступами: размер выступа 5x4 мм, общая геометрическая площадь контакта 60 мм². Диаметр ролика составлял 43 мм. Температуру смазочного материала 5 в чашке 4 измеряли с помощью ртутного термометра с ценой деления 0,5 °С. Перед испытаниями колодку и ролик промывали ацетоном и высушивали. Испытания проводили трехкратно в течение 180 мин. Перед началом испытаний колодка 2 и ролик 1 прошли приработку с использованием базового масла в чашке 4 емкостью 200 мл до стабилизации температуры масла и момента трения.

Исходные параметры испытаний: частота вращения ролика $\omega = 500$ мин⁻¹; осевая нагрузка $P_{ос} = 3000$ Н; давление на контакте 50 МПа; начальная температура смазочного материала $T_n = 20$ °С в чашке 4; интервал времени, через который фиксируется температура разогрева смазочного материала в чашке, составлял 5...15 мин; общее время испытаний составляло 0,25; 0,5; 1; 2; 3 ч.

За конечные параметры испытаний приняты: момент трения в сопряжении, Н·м; конечная температура смазочного материала T_k в чашке 4, °С; температура дымления смазочного материала $T_{кр}$ в сопряжении «колодка – ролик», °С; время испытания до начала дымления, мин.

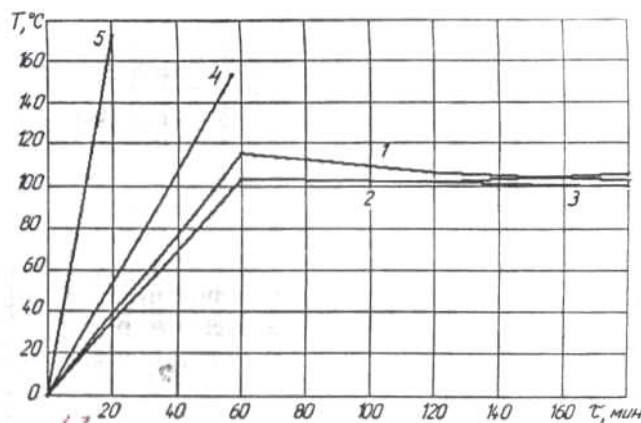


Рис. 5.3. Изменения температуры T смазочного материала в чашке 4 за время испытаний

Из представленных графиков (см. рис 6.3) следует, что образцы 1 – 3 с разной концентрацией МСК «Валена» отличались незначительно как по моменту трения, так и по температуре разогрева масла в чашке 4. Температурная стойкость их высокая и стабильная, причем после испытаний в течение 1 ч наметилась тенденция к некоторому снижению моментов трения и температуры разогрева смазочного материала в чашке 4.

Образцы 4, 5 без МСК «Валена» оказались менее термостойкими по сравнению с образцами 1 – 3. Так, при испытаниях образца 4 существенно (почти в 2 раза) увеличился момент трения, температура разогрева масла в чашке достигла 180 °С (выше, чем для образцов 1 – 3 примерно на 30 %).

При испытании образца 5 через 20 мин началось дымление смазки. Испытания были приостановлены из-за опасности возгорания смазочного материала.

Обширные экспериментальные исследования уменьшения интенсивности износа пар трения при применении различных смазочных материалов, а также их термостойкость были проведены на кафедре МТ-13 МГТУ им. Н.Э. Баумана в лаборатории триботехники. Разработана методика экспериментальной оценки термостойкости смазочных материалов: жидких и пластичных.

Сущность методики заключается в триботехнических испытаниях сопряжений в соответствии с пат. № 2378637, при которых регистрируется температура саморазогрева окружающего их смазочного материала, по величине которой оценивают его температурную стойкость. Методика позволяет попутно сделать оценку пятна контакта, линейного, объемного и весового износа испытываемых образцов в исследуемой на термостойкость смазочной среде.

Термины и определения трибологических характеристик при испытаниях приведены в табл. 5.1.

Трибологические характеристики и размерности контролируемых величин

| Наименование | Обозначение | Единица измерения |
|--|--------------|-------------------|
| Температура саморазогрева смазочного материала | T_c | °С |
| Температура дымления смазочного материала | $T_{кр}$ | °С |
| Время испытания до начала дымления | $t_{кр}$ | мин |
| Осевая нагрузка | $P_{ос}$ | кгс, Н |
| Размеры пятна контакта | $a \times b$ | мм×мм |
| Площади пятна контакта | $S_{ПК}$ | мм ² |
| Линейный износ | U_l | мм |
| Объемный износ | $U_{об}$ | мм ³ |
| Массовый износ | U_g | г |
| Момент трения | $M_{тр}$ | Н×м |
| Коэффициент трения | $\mu_э$ | — |
| Контурное давление | P_k | МПа |

Методика предусматривает четыре схемы испытаний: испытание при контакте вращающегося ролика (кольца) с роликом 08x20 Д IV по ГОСТ 22696-77 (рис. 5.4, а); испытание при контакте вращающегося ролика (кольца) с колодкой с двумя карманами для смазочных материалов (рис. 5.4, б); испытание при контакте вращающегося диска с пальцем (рис. 5.4, в); испытание при контакте пластины с пальцем при возвратно-поступательном движении пластины (рис. 5.4, г).

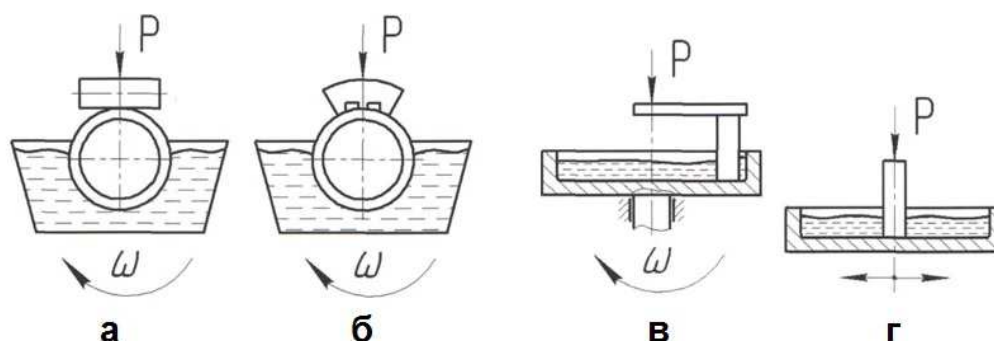


Рис. 5.4. Схемы испытаний образцов:

а – ролик (кольцо)–ролик; б – ролик–колодка; в – диск–палец; г – пластина–палец.

Испытания по этим схемам могут быть распространены на испытания смазочных материалов на термостойкость для подшипников скольжения, подшипников качения, зубчатых колес, сопряжений кулачок – толкатель, подпятников, поршневого кольца – гильзы цилиндра ДВС и других узлов трения.

Испытания на машине трения МТ-10 (Тимкена-Айшингера) (рис. 5.5) по схемам рис. 5.4 выполняются как сравнительные экспресс-испытания. Схемы испытаний приведены на рис. 5.6, 5.7.

Техническая характеристика машины трения МТ-10

1. Привод клиноременный
2. Электродвигатель 220В/50А
3. Частота вращения рабочего ролика – 400 об/мин.
4. Набор грузов по 0,45 кг -14,85 кг
5. Максимальная нагрузка на валу трения -300 кг.
6. Смазки образцов погружением в масляную ванну.
7. Изменение нагрузки – ступенчатое
8. Вес машины-15 кг.
9. Потребляемая мощность – 400 Вт.
10. Габариты – 500 х 250 х 260 мм.

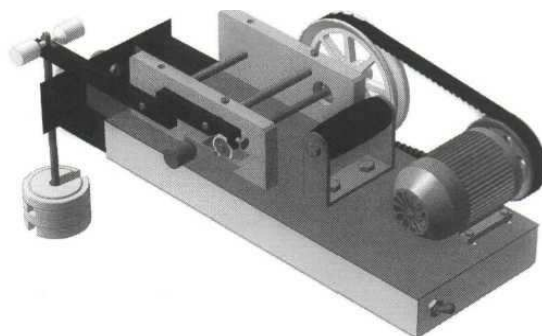


Рис. 5.5. Общий вид машины трения МТ-10

Тестовая машина трения МТ-10 вращательного действия работает следующим образом: ролик (кольцо) на валу приводится во вращение от электродвигателя и смазывается погружением в масляную ванну. Ролик, заключенный в обойму, прижимается к ролику (кольцу) с усилием, обеспечиваемым грузами и системой рычагов. Таким образом, между роликом (кольцом) и роликом возникают процессы трения и износа. Частота вращения ролика (кольца) постоянная – 400 об/мин, максимальная нагрузка на пару трения – 300 кг. Изменение нагрузки производится ступенчато путем

снятия или навешивания грузов на чашку рычажного механизма: один груз (чашка) весом 0,45 кг обеспечивает нагрузку 14,85 кг.

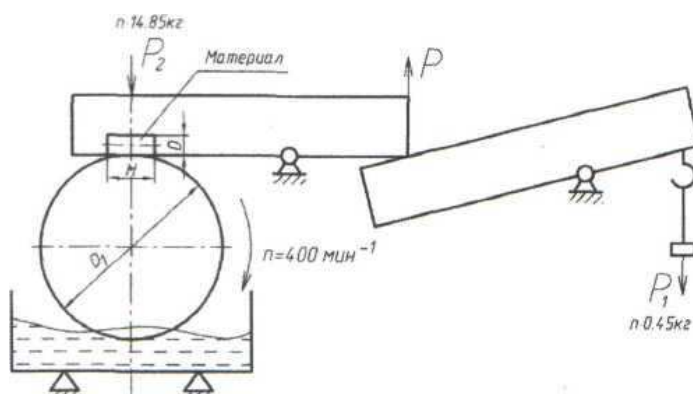


Рис. 5.6. Схема испытаний на термостойкость на машине трения

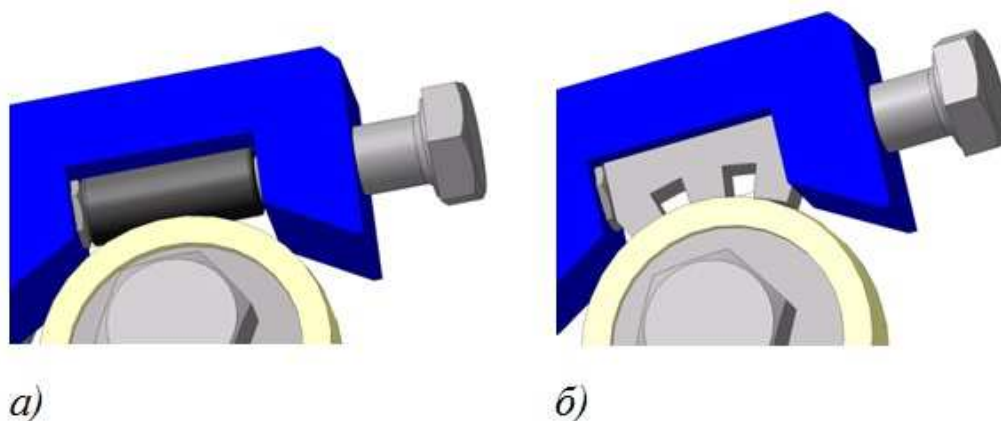


Рис. 5.7. Схемы испытаний на машине трения МТ-10:

а – «ролик (кольцо) – ролик»; б – «колодка – ролик»

Оценочными параметрами испытываемых материалов на данной машине служат параметры: температура саморазогрева масла в ванне; пятно контакта, характеризующее износ сопряжения; размер и состояние поверхности пятна износа ролика.

Исследованы смазки: Буксол М; Лукойл-стандарт; Ligni Moli; Лукойл-супер; Luxe (Molibden); Блезформ; Mannol (Molibden); Super Luxe; Волга Ойл Плюс; Shell Helx; Castrol Six Prot; Zic HFLO; Mobil Super 1000; Esso Ultra; Пума М, а также противоизносные присадки: МСК «Валена» по ТУ0257-001-17368431-05; АКМ; Ремтек; Стрибол; Хадо; Fenom; Oil Additive LM; Ремет; SMT2; ER; Plamet; Comma Plus; Форсан.

Результаты исследований композиций и смазочных материалов приведены в табл. 5.2. В качестве образцов были выбраны пары трения: ролик (кольцо) из стали У8А (58...62 HRC) - ролик 8x20DIV по ГОСТ 22696-77 из стали ШХ15. Также в табл. 5.2 приведены температуры саморазогрева

различных композиций смазочных материалов и величины износа пятна контакта образцов.

Особый интерес для исследователей и производителей представляют результаты экспериментов по оценке влияния концентрации присадки в маслах и пластичных смазочных материалах на термостойкость и износостойкость пар трения (рис. 5.8 – 5.10).

Анализ результатов исследований, приведенных в табл. 5.2 показывает, что по термостойкости МСК «Валена» превосходит отечественные и зарубежные смазочные композиции.

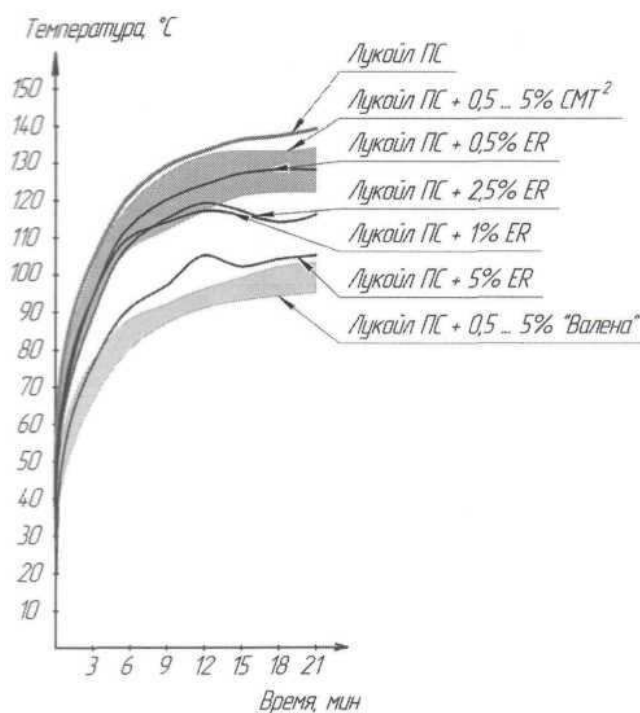


Рис. 5.8. Зависимость температуры саморазогрева смазочных композиций от времени испытаний

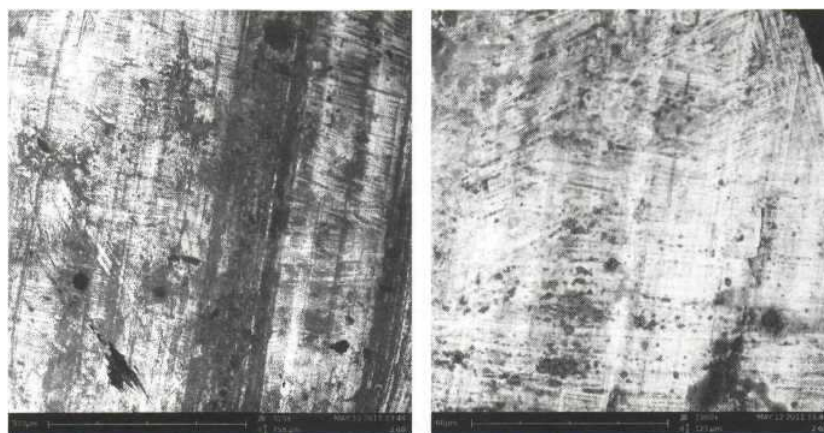


Рис. 5.9. Эффект ИП меди на поверхность испытуемого образца (светлые пятна меди на образце из стали 45)

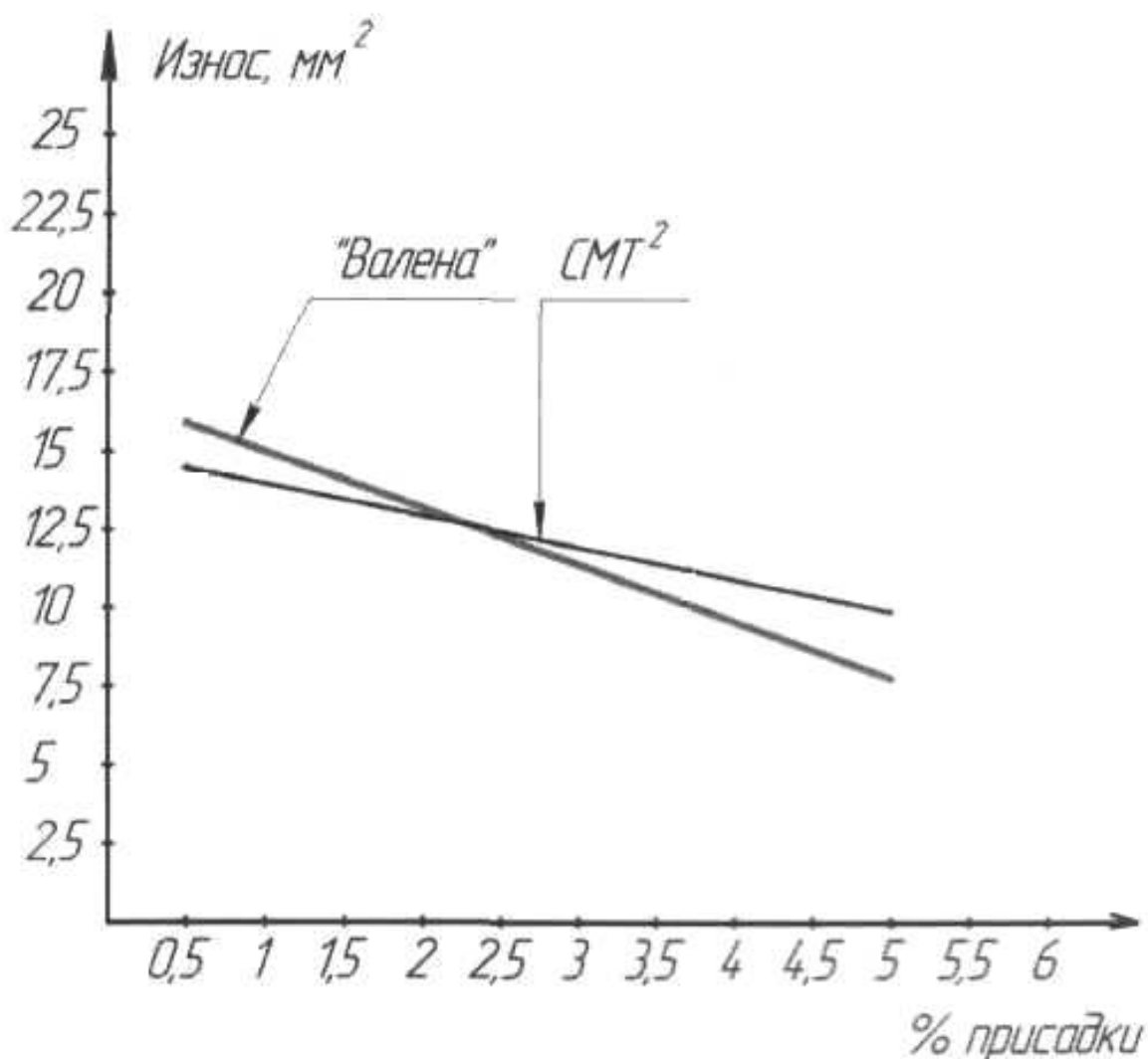


Рис. 5.10. Зависимость износа от процентного содержания присадки в масле

Испытания (табл.5.2) показали, что наиболее эффективной по износостойкости присадкой к моторным маслам является МСК «Валена» [7].

Наиболее эффективной присадкой по температурной стойкости стала также – МСК «Валена». Это объясняется тем, что МСК «Валена» в зоне контакта сопряженных деталей способствует образованию медной защитной (сервовитной) пленки, которая отводит тепло из узла трения.

На образцах из стали 45 (колодках) образовались медные сервовитные пленки в виде светлых пятен (рис. 5.9). Исследования проводились в Наноцентре МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Наиболее приемлемой и рекомендуемой к внедрению присадкой к моторным маслам, а также к смазочным материалам «Блезформ», «Камаз», «Взлет» и др. является МСК «Валена» (А. с. № 2277579) в концентрациях 0,5...2,5 % по объему (рис 5.10).

Таблица 5.2

**Результаты испытаний некоторых композиций по схеме сопряжения
«кольцо-ролик»**

| № | Смазочный материал | Добавка, % | Максимальная температура смазочной среды, °С | Площадь пятна износа, мм ² | Образование медной плёнки |
|----|--------------------|---------------------|--|---------------------------------------|---------------------------|
| 1 | Super Luxe | ER, 12,5% | 122 | 4.18 | – |
| 2 | Лукойл стандарт | Fenom, 12,5% | 106 | 4.54 | – |
| 3 | Лукойл стандарт | МСК «Валена», 12,5% | 85 | 6.42 | + |
| 4 | Liqui Moly | МСК «Валена», 12,5% | 87 | 7.04 | + |
| 5 | Blazeform | АМК, 12,5% | 96 | 7.94 | – |
| 6 | Лукойл стандарт | АМК, 12,5% | 91 | 8.11 | + |
| 7 | Mannol Molybden | МСК «Валена», 12,5% | 96 | 8.29 | + |
| 8 | Super Luxe | SMT2, 12,5% | 120 | 8.97 | – |
| 9 | Liqui Moly | – | 112 | 9.37 | + |
| 10 | Лукойл стандарт | АМК, 12,5% | 92 | 9.54 | – |
| 11 | Luxe Molybden | МСК «Валена», 12,5% | 93 | 9.64 | – |
| 12 | Волга Ойл Пасс | МСК «Валена», 12,5% | 100 | 9.94 | + |
| 13 | Super Luxe | МСК «Валена», 12,5% | 105 | 10.9 | – |
| 14 | Лукойл супер | МСК «Валена», 12,5% | 90 | 10.14 | + |
| 15 | Super Luxe | Comma Plus, 12,5% | 129 | 12.9 | – |
| 16 | Mobil Super 1000 | – | 135 | 13.6 | – |
| 17 | Esso Ultra | – | 143 | 14.7 | – |
| 18 | Total Quartz 7000 | – | 111 | 15.96 | – |
| 19 | Лукойл стандарт | – | 127 | 16.72 | – |
| 20 | Shell Helix | – | 101 | 16.95 | – |
| 21 | ZIC HIFLO | – | 130 | 17.15 | – |
| 22 | Super Luxe | Oil Addtir LM 12,5% | 109 | 18.10 | – |
| 23 | Super Luxe | Pumet, 12,5% | 97 | 18.13 | – |
| 24 | Super Luxe | – | 128 | 18.67 | – |
| 25 | Буксол М | – | 81 | 20.58 | – |
| 26 | Super Luxe | PlaMet, 12,5% | 123 | 20.58 | – |
| 27 | Super Luxe | Pumet, 12,5% | 118 | 20.90 | – |
| 28 | Super Luxe | Форсан, 12,5% | 133 | 21.33 | – |
| 29 | Castrol SLX Prof | – | 127 | 23.75 | – |
| 30 | Стрибол | – | 95 | 23.94 | + |
| 31 | Dexelia Ultra | – | 118 | 26.18 | – |
| 32 | Пума М | – | 160 | 33.18 | – |
| 33 | Blazeform | – | 120 | 39.4 | – |

Результаты всех испытаний заносятся в протоколы по Методике №01-13-ОД–2011 МГТУ им. Н.Э. Баумана, которые являются сертификационным паспортом смазочной композиции на термостойкость и износостойкость (рис. 5.11) [11].

Методика испытаний не распространяется на твердые смазочные материалы.

| МГТУ им. Н.Э.Баумана | | | | | | Кафедра МТ-13 | | | | | |
|---|---------------------|----------|-------------------------------|--------------------|---|----------------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|--|
| Паспорт (сертификат) на исследование смазочного материала на термостойкость | | | | | | | | | | | |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Смазочный материал – <i>Масло моторное М14В</i> 2. Присадка – <i>12,5% присадки «Валена»</i> 3. Осевая нагрузка – <i>600 Н</i> 4. Давление на контакте – <i>10 МПа</i> 5. Скорость вращения ролика – <i>460 мин⁻¹</i> 6. Время испытаний при заданной нагрузке – <i>3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 мин</i> 7. Начальная температура смазочного материала $T_H \approx 20^\circ\text{C}$ 8. Температура саморазогрева смазочного материала $T_C = 127^\circ\text{C}$ 9. Критическая температура $T_{кр}$ – <i>дымление отсутствует</i> 10. Объем смазочного материала в испытательной ванне – <i>50 мл</i> 11. Площадь контакта – <i>60 мм²</i> | | | | | | | | | | | |
| Протокол испытаний | | | | | | | | | | | |
| № д/п | Смазочный материал | Присадки | Кол-во присадки в % от смазки | Осевая нагрузка, Н | Давление на контакте, Н/мм ² | Скорость вращения ролика, об/мин | Время испытаний | $T_H, ^\circ\text{C}$ | $T_C, ^\circ\text{C}$ | $T_{кр}, ^\circ\text{C}$ | Примечания |
| 1. | Масло моторное М14В | - | - | 600 | 10 | 500 | 3 | 20 | 104 | 160 | При $T_{кр} = 160^\circ\text{C}$ начинается дымление |
| | | | | | | | 6 | 20 | 113 | | |
| | | | | | | | 9 | 20 | 115 | | |
| | | | | | | | 12 | 20 | 116 | | |
| | | | | | | | 15 | 20 | 122 | | |
| | | | | | | | 18 | 20 | 125 | | |
| | | | | | | | 21 | 20 | 127 | | |
| 2. | Масло моторное М14В | «Валена» | 12,5% | 600 | 10 | 500 | 3 | 20 | 74 | - | Дымление отсутствует |
| | | | | | | | 6 | 20 | 82 | | |
| | | | | | | | 9 | 20 | 86 | | |
| | | | | | | | 12 | 20 | 82 | | |
| | | | | | | | 15 | 20 | 82 | | |
| | | | | | | | 18 | 20 | 82 | | |
| | | | | | | | 21 | 20 | 82 | | |
| <p>Примечание: Если необходимо установить $T_{кр}$ в пределах времени испытаний 21 мин, то следует увеличить давление на контакте или скорость вращения, либо оба параметра одновременно.</p> <p>Испытания провёл _____ (Бодарева А.В.) «__» _____ 200_г.</p> | | | | | | | | | | | |

Рис. 5.11. Паспорт-сертификат на смазочный материал

Список литературы

1. Гаркунов Д.Н. Триботехника. Износ и безызносность/учебник для вузов. М.: МСХА, 2001. 611с.
2. Гаркунов Д.Н., Мельников Э.Л., Гаврилюк В.С. Триботехника. Краткий курс/ учеб. пособие. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2008. 308 с.
3. Гаркунов Д.Н., Бабель В.Г., Мамыкин СМ., Мельников Э.Л., Гаврилюк В.С. Новые направления в триботехнике и их использование в повышении износостойкости механизмов и машин. М.: МСХА, 2007. 58 с.
4. Гаркунов Д.Н., Мамыкин СМ., Мельников Э.Л., Гаврилюк В.С. Экологическая и экономическая эффективность новых решений трибологических проблем // Промышленная политика в Российской Федерации. 2008. № 28. С. 41–52.
5. Технический паспорт на машину трения МТ-10.
6. Патент РФ. № 2378637 РФ. Способ испытания смазочных материалов на температурную стойкость. Гаркунов Д.Н., Мельников Э.Л., Мамыкин С.М.
7. Патент Р.Ф. №2277579. Металлосодержащая маслорастворимая композиция для смазочных материалов. Бабель В.Г., Гаркунов Д.Н., Мамыкин С.М., Корник П.И.
8. Мельникова Л.А., Симушкин А.В. Разработка безызносных узлов трения // Студенческий научный вестник. 2009. Т. IX.С. 102–110.
9. Методика 01-13-ОД-2011 экспериментальной оценки температурной стойкости смазочных материалов при трении. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. 33 с.
10. Зайцев А.К. Основы учения о трении, износе и смазке машин. М.: Машиностроение, 1948. 280 с.
11. Мельников Э.Л., Сережкин М.А., Бодарева А.В., Гречкин А.П. Сравнительные исследования термостойкости и износостойкости некоторых отечественных и зарубежных моторных масел и противоизносных присадок к ним. Ремонт восстановление модернизация, №4, 2012., с. 37-41.

Глава 6. Трибология в XXI веке

6.1. Развитие машиностроения и трибология

Трибология в настоящее время находится в начале нового этапа развития. Устаревшие представления еще прочно занимают свои позиции, а новые взгляды и положения еще недостаточно окрепли и лишь постепенно получают признание.

Движение той или иной науки определяется объективными законами, однако для успешного развития науки необходимо знать ее магистральные направления.

В этой связи попытаемся дать прогнозы развития трибологии на предстоящие 10 – 15 лет и ответить на вопросы: что определит направление развития трибологии, где имеются резервы, неисследованные области. Чему нужно уделить больше внимания?

Этими вопросами задаются конструкторы, технологи, эксплуатационники, ремонтники; те же вопросы стоят перед учеными-исследователями в области трения, изнашивания и смазывания машин.

В обозримом будущем машиностроение будет развиваться в плане создания автоматизированных комплексов и систем машин, оборудования по автоматизации сборочных работ и в целом строительства автоматических цехов и заводов.

Огромное значение приобретает развитие промышленности в восточных и северных районах страны, что потребует производства машин, способных выдерживать более высокие нагрузки и обладать большей надежностью. Можно ожидать развертывания работ по освоению шельфа морей и океанов. Это потребует создания совершенно новой техники.

Одним из направлений развития машиностроения является создание и внедрение гибких автоматизированных производств (ГАП), роботокomплексов, станков-автоматов, обрабатывающих центров.

При огромном парке машин и оборудования рост эффективности производства невозможен без повышения долговечности техники и снижения затрат на ее эксплуатацию и ремонт.

Перед трибологией стоят сложные задачи:

1. В 2–3 раза повысить сроки службы сельскохозяйственной техники, двигателей внутреннего сгорания, компрессоров, автомобилей, металлообрабатывающего оборудования и других машин массового применения;

2. Снизить затраты на ремонт машин и их техническое обслуживание, для чего уменьшить регулировочные работы, в несколько раз сократить объем смазочных работ, исключить дорогостоящие финишные операции при изготовлении трущихся деталей, снизить расход смазочных материалов;
3. Снизить силы трения в машинах, повысить их КПД, сократить время приработки машин;
4. Создать новые конструкции узлов трения с использованием современных антифрикционных и износостойких материалов, способных нести нагрузки в 1,5–2 раза большие, чем прежние;
5. Разработать новые смазочные материалы для работы при высоких температурах, с лучшей смазывающей способностью, обеспечивающие большую стойкость материалов к задирам при трении.

Указанные задачи вполне выполнимы, они исходят из научных достижений трибологии.

6.2. Новый подход к изучению трибологии

За последние 30 лет интенсивно развивается новый подход к изучению физических, химических и биологических систем на основе синергетики — дисциплины, которую можно характеризовать как направление в современном естествознании.

Трибология базируется на ряде дисциплин: механике, физике, химии, металлостроении и др. Специалисты по трибологии обратили внимание и на синергетику, поскольку трибосистема является открытой и в ней могут происходить кооперативные явления.

К некоторым разделам триботехники могут быть применены методы синергетики: это ИП при трении и водородное изнашивание.

Оба явления характеризуются рядом последовательных этапов и кооперативным действием отдельных элементов. Синергетический подход к изучению ИП и водородного изнашивания дает возможность глубже проникнуть в механизм явлений, что облегчит разработку новых эффективных методов борьбы с изнашиванием машин и оборудования.

Так, из последовательных этапов проявления водородного изнашивания достаточно разорвать одно звено, как может нарушиться вся цепь процессов.

В одних случаях выделившийся водород можно связать химически с другими элементами или веществами, в других — «отогнать» водород электрическим или магнитным полем, в третьих — затруднить процесс диффузии водорода в глубь металла.

Трение является неравновесным термодинамическим процессом, известно давно, но только в последние годы установлено, что при глубокой неравновесности и нелинейности возможна самоорганизация и образование структуры системы трения иного порядка, чем трение при граничной смазке. Таким образом, выявилась возможность работы при более совершенной системе, чем трение при граничной смазке, а одновременно и возможность существования разных (двух) систем трения – при граничной смазке и ИП.

Автор работ по термодинамической теории структур и самоорганизации в неравновесных системах И.Р. Пригожий установил, что некоторые открытые системы при переходе от равновесных условий к условиям, далеким от равновесных, становятся неустойчивыми и их макроскопические свойства радикально меняются.

Таковыми свойствами обладают многие биологические системы, причем во всех случаях существует, видимо, термодинамический порог самоорганизации, четко разграничивающий класс равновесных структур и класс структур, называемых диссипативными.

Применительно к трению твердых тел, которое всегда диссипативно, это означает переход за некоторую критическую зону, где при больших отклонениях от равновесного состояния физические системы ведут себя, как правило, нелинейно.

Именно здесь проявляются самоорганизация и когерентное поведение подсистем, выражающееся в образовании систем снижения износа и трения (СИТ).

По существу это открытие новых областей в физике и, в частности, в трении, где термодинамически возможная самоорганизация новых структур осуществляется в виде нового, более совершенного вида трения, чем трение при граничной смазке.

Процесс превращения механической энергии в тепловую происходит в поверхностном слое, деформируемом при трении на относительно небольшую глубину (приблизительно 0,1...0,3 мм) в зависимости от скорости скольжения и нагрузки. В этой зоне, являющейся генератором теплоты, возникают максимальные температуры и напряжения, происходит накопление энергии в виде концентрации дислокаций и других дефектов решетки, ведущих к разрушению.

Зона интенсивного воздействия силы трения на металл является ловушкой для водорода. Зона же контакта поверхностей является генератором водорода из влаги, воздуха, смазочного материала, пластмассы и других материалов и элементов среды. Существует большое число путей образования водорода при трении из указанных веществ, содержащих водород.

Таким образом, изнашивание обуславливается не столько механическим взаимодействием поверхностей трения, сколько водородной хрупкостью поверхностного слоя. Степень наводороживания изменяется под действием факторов среды и внутренних условий и может ускорить изнашивание на один-два порядка. Решающую роль здесь играют термодинамические факторы.

Из изложенного ясно проступают черты новой концепции трения, основанной на глубокой теоретической проработке раздела физики – термодинамики образования самоорганизующихся структур при необратимых процессах.

Как подтвердила практика, термодинамические процессы диссипации энергии трения оказались более фундаментальными, чем процесс разрушения поверхностей.

6.3. Программа исследований водородного изнашивания и избирательного переноса

ИП при трении и водородное изнашивание металлов – это два совершенно противоположных явления. Все процессы, протекающие при водородном изнашивании, направлены на то, чтобы разрушить поверхностный слой, усилить интенсивность изнашивания, облегчить процесс диспергирования.

При ИП процессы направлены на снижение контактных давлений, уменьшение разрушения поверхностного слоя, компенсацию уноса частиц износа, создание условий полной безызносности. Физические механизмы как водородного изнашивания, так и ИП сложны. Кроме того, одно явление может подавлять другое.

Изучение водородного изнашивания и ИП находится еще в начальной стадии, поэтому как в теоретическом плане, так и в плане разработки и реализации в промышленности новых методов борьбы с изнашиванием машин и оборудования на основе этих явлений прослеживается комплекс исследований, результаты которого будут способствовать решению задач, поставленных перед триботехникой.

Исходя из развитых представлений о водородном изнашивании, научно-исследовательских работ и потребностей производства, можно рекомендовать следующие направления:

1. Разработка приборов и методов исследования водородного изнашивания деталей машин;
2. Изучение процессов наводороживания металлов при трении с фрикционными пластмассами для оценки количественных характеристик перераспределения водорода в поверхностных слоях, изучения свойств наводороженного металла при трении, влияния режимов трения на

наводороживание с широким использованием новейших методов исследования;

3. Исследование наводороживания наиболее изнашиваемых деталей машин и оборудования в процессе эксплуатации и оценка вклада в снижение их износостойкости как биографического, так и образуемого при трении водорода с целью разработки требований к качеству материалов, смазочным материалам и специальным жидкостям, применяемым в узлах трения;
4. Исследование влияния электрического и магнитного полей на процессы наводороживания при трении в целях определения количественных характеристик процессов и разработки новых путей борьбы с водородным изнашиванием;
5. Изучение физико-химических процессов, происходящих в различных парах трения при водородном изнашивании, и установление характеристик реакционной способности поверхностей при различных режимах работы;
6. Изучение газовыделения при трении в вакууме различных пар трения и исследование влияния деформаций на диффузионные перемещения водорода при трении;
7. Исследования в области подавления водородного изнашивания пары трения металл – древесина с целью повышения нагрузочной способности и расширения областей использования материалов на основе древесины в узлах трения машин и оборудования;
8. Разработка научных основ и методов подавления водородного изнашивания в узлах трения, смазываемых водой, при высоких давлениях и скоростях скольжения;
9. Разработка методов подавления водородного изнашивания в парах трения сталь – титановые сплавы в целях повышения антифрикционных характеристик таких пар и расширения областей их применения в узлах трения;
10. Разработка методов оценки наводороживания материалов тормозных устройств в условиях стендовых и эксплуатационных испытаний;
11. Изучение газонасыщения титановых сплавов при различных условиях расклинивающего действия образующихся гидридов титана, микроструктуры и свойств поверхностных слоев при водородном изнашивании титановых сплавов;
12. Изучение общих закономерностей водородного изнашивания и обнаружение областей его проявления, а также создание научных основ борьбы с ним;

13. Разработка стандартных методов оценки наводороживания материалов при трении и методов испытаний на износостойкость при водородном изнашивании;
14. Исследование наводороживания стальных деталей при технологических операциях (механическая, термическая и химико-термическая обработка) и оценка влияния технологического водорода на долговечность трущихся деталей; разработка методов борьбы с технологическим водородом;
15. Изучение действия водорода при абразивном изнашивании в условиях коррозионно-активных сред и повышенной влажности, фреттинг-коррозии, контактной усталости, коррозионно-механического изнашивания, кавитации и эрозии;
16. Разработка методов подавления водородного изнашивания деталей авиационной техники, нефтехимического оборудования, грунтовых насосов, железнодорожного транспорта и других машин и оборудования, металлорежущего и деревообрабатывающего инструмента, инструмента по обработке меховых изделий и внедрение их на заводах промышленности. В каждой отрасли промышленности эти работы следует выполнять поэтапно.

Первый этап – определение ответственных трущихся деталей и рабочих органов машин и оборудования, подверженных водородному изнашиванию, составление альбома деталей и исследование физико-химических свойств их поверхностей. Второй этап включает изучение закономерностей водородного изнашивания деталей и рабочих органов машин, а также разработку и проверку методов защиты от водородного изнашивания в стендовых и эксплуатационных условиях. Последний этап заключается во внедрении разработанных рекомендаций на предприятиях отрасли.

К первоочередным задачам по изучению ИП при трении следует отнести:

- 1 Создание комплекса приборов и установок для изучения ИП и разработку новых смазочных материалов, обеспечивающих режим ИП;
- 2 Исследование работоспособности шариковых и роликовых подшипников, а также зубчатых передач в условиях ИП;
- 3 Разработку технологических процессов ФАБО цилиндров двигателей внутреннего сгорания, а также шеек коленчатых валов с нанесением на поверхности трения тонких слоев бронзы, латуни или меди в целях снижения времени обкатки, повышения КПД и надежности работы двигателей;
- 4 Создание присадок к смазочным материалам, обеспечивающих режим ИП в двигателях внутреннего сгорания, как для приработки, так и для установившейся работы;

- 5 Исследование конструктивных особенностей смазочных систем при работе на металлоплакирующих смазочных материалах, определение их эксплуатационных характеристик и оценку эффективности применения;
- 6 Разработку комплекса мероприятий применительно к узлам трения технологического оборудования (станки, кузнечные прессы, литейные машины, прокатные станы), обеспечивающего режим ИП, включая применение смазочных систем, новых финишных безабразивных операций обработки шеек валов и использование методов большего удержания смазочного материала поверхностями трения;
- 7 Исследование возможности применения ИП при штамповке, дорновании, протяжке, определение оптимального состава смазочно-охлаждающих жидкостей и их эффективности;
- 8 Исследование ИП в вакууме и различных газовых средах;
- 9 Расширение исследований по использованию ИП в экстремальных условиях: разработка температуростойких жидкостей типа перфторэфиров для работы при температурах 200...300 °С; разработка низкотемпературных смазочных материалов для работы при температуре до -60 °С; разработка смазочных материалов для давлений 400...800 МПа;
- 10 Исследование трения без смазочного материала в режиме ИП в парах металл – металл, металлополимер – металл;
- 11 Исследование и разработку композиционных полимерных систем (наполненных и ненаполненных), работающих в режиме ИП (для подвижных сочленений машин и оборудования);
- 12 Создание смазочных материалов (жидких и пластичных) для нефтяного и бурового оборудования, работающего в широком диапазоне температур (от -70 до +300 °С), с добавками, обеспечивающими режим ИП;
- 13 Разработку новых износостойких и антифрикционных порошковых материалов, работающих в режиме ИП, внедрение их на промышленных предприятиях с учетом опыта разработки и применения подобных материалов на предприятиях нефтяной и электротехнической промышленности;
- 14 Значительное расширение производства манжетных и других уплотнений на основе полиуретанов, работающих в режиме ИП, и применение уплотнений в ряде отраслей промышленности; разработку узлов трения без смазочного материала с сервовитной пленкой на керамической и других твердых основах, заменяющих металл;
- 15 Разработку рецептов смазочных материалов и присадок к ним, обеспечивающих металлоплакирование в зоне контакта трущихся деталей,

создание опытного производства смазочных материалов и внедрение их на промышленных предприятиях.

Эту работу целесообразно проводить по этапам. На первом этапе необходимо разработать и изготовить опытные партии металлоплакирующих смазочных материалов, реализующих ИП в узлах трения машин и механизмов; при этом следует использовать опыт применения таких смазочных материалов в ряде отраслей техники. Второй этап включает опытное производство смазочных материалов, обеспечивающих режим ИП в узлах трения машин и оборудования. Третий этап – проведение стендовых и эксплуатационных испытаний машин и оборудования при работе на металлоплакирующих смазочных материалах и оценка эффективности их действия.

Заключительный этап – работа по внедрению металлоплакирующих смазочных материалов на промышленных предприятиях и в организациях, эксплуатирующих технику (для ускорения работ целесообразно этапы проводить параллельно); разработка высокоэффективных групп подшипников скольжения (по типу подшипников качения) с использованием современных методов обработки покрытий и смазывания поверхностей трения.

Другими важнейшими направлениями изучения триботехники являются:

1. Исследования и разработка новых способов смазывания узлов трения (например, редукторов) путем использования магнитных порошков, содержащих твердые смазочные материалы (молибденит), и определение области рационального использования метода;
2. Исследования эффекта аномально низкого трения в направлении формирования и стабилизации сильно ориентированных структур, радиационно-химического модифицирования эластомеров, керамических и других материалов в целях улучшения их антифрикционных характеристик;
3. Исследования механизма разрушения поверхностных слоев при абразивном изнашивании в условиях коррозионного воздействия внешней среды, фреттинг-коррозии, коррозионно-механического изнашивания, кавитации и эрозии, диспергирования, схватывания, циклической контактной нагрузки; разработка методов снижения указанных видов изнашивания и повреждения поверхностей трения;
4. Развитие теоретических основ газовой смазки, методов расчета конструкций газовых опор и их оптимизация с учетом нестационарности движения трущихся деталей;
5. Разработка методики ускоренных испытаний подвижных сочленений на износостойкость при абразивном изнашивании, диспергировании, кавитации и эрозии и на контактную прочность в условиях воздействия коррозионно-активных сред и поверхностно-активных веществ;

6. Исследования по определению областей целесообразного использования и выявлению оптимальных технологических процессов создания фрикционных и антифрикционных покрытий газопламенным, вакуумно-ионным и детонационным способами;
7. Разработка мероприятий по повышению долговечности узлов трения гибких производственных модулей, роботов, манипуляторов и др.;
8. Повышение контактной прочности в подшипниках качения, в зубчатых и кулачковых передачах; значительно (до 2 раз) снизить потери на трение, шумовые эффекты в результате применения металлоплакирующих СМ, обработки деталей ФАБО;
9. Разработка тепловых расчетов фрикционных узлов трения с учетом кинетики физико-химических процессов и того, что при тяжелых условиях трения максимальную температуру имеют слои, находящиеся на некоторой глубине от поверхности трения;
10. Создание научно-технической документации по триботехническим свойствам материалов пар трения, смазочных материалов и износостойких антифрикционных и фрикционных покрытий, разработка стандартов на основные и наиболее эффективные методы повышения износостойкости деталей машин, оборудования и приборов, а также на топливо, смазочные материалы, специальные жидкости, фрикционные и антифрикционные износостойкие материалы, приработочные покрытия.

6.4. Исследование электрических, магнитных и вибрационных явлений при изнашивании

В литературе по триботехнике неоднократно рассматривалось влияние электрических, магнитных и вибрационных процессов на изнашивание при трении.

Одновременно публиковались результаты исследований, которые свидетельствовали, что роль электрических явлений, например, при изнашивании режущего инструмента, очень мала, и они практически не могут быть использованы для повышения износостойкости режущего инструмента.

Этим явлениям противопоставляются такие факторы, влияющие на износ, как пластические деформации, окисление поверхности, тепловые явления, которые якобы сводят на нет роль электричества.

Однако последние исследования процесса водородного изнашивания, выполненные В.М. Юдиным, В.И. Колесниковым, Г.И. Сурановым, Э.А. Станчуком и другим, показали, что здесь кроются большие резервы в повышении сроков службы деталей машин и режущего инструмента. Исследование электрических и магнитных явлений при трении — это один из наиболее достоверных и эффективных путей изучения самой природы трения.

Разрушительной силой в данном случае является именно водород, а не электрическое или магнитное поле. Это связано с тем, что водород имеет электрический заряд, который взаимодействует с указанными полями.

Как отмечалось ранее, вибрации с высокими частотами также воздействуют на скорость изнашивания не сами по себе, а посредством электрических явлений, которые, в свою очередь, влияют на движение водорода и способствуют его образованию.

Тепловые факторы, как и напряжения, влияя самостоятельно на трение и износ, являются процессами образования водорода и способствуют продвижению его в зону контакта.

Исследование электрических и магнитных явлений при трении – это один из наиболее достоверных и эффективных путей изучения самой природы трения.

Напомним, что именно трение позволило человеку открыть огонь и теплоту, электрон и электричество, создать первые электрические машины, получить один из самых сильных методов ускорения химических реакций и многое другое. Трение обусловлено не только внешним воздействием, но и внутренними силами природы, главным образом электрическими и магнитными.

6.5. Совершенствование смазывания деталей

Смазка резко снижает интенсивность изнашивания. Достаточно ввести в зону контакта деталей небольшое количество смазочного материала (толщина смазочного слоя 0,1 мкм), как сила трения может снизиться в 10 раз, а износ поверхностей трения до 1000 раз.

Современные машины и оборудование содержат большое число узлов трения (от десятков до тысяч), которые испытывают высокие давления, температуры и скорости скольжения. В России и за рубежом разработаны специальные смазочные системы, которые автоматически, через строго определенный промежуток времени, подают в зону трения заданное количество смазочного материала. В настоящее время уровень технического совершенства машин во многом определяется степенью организации смазывания узлов трения.

Эффективность смазочной системы зависит от ее конструктивного совершенства и качества смазочного материала. Пока нет четких рекомендаций по дозировке и длительности подачи смазочных материалов в конкретные узлы трения машины. При переводе трущихся деталей машин в режим ИП необходимо создавать принципиально новые смазочные системы, которые бы обеспечили автоматическое регулирование параметров работы системы в зависимости от режима работы машины, т.е. необходимо разрабатывать

адаптированные смазочные системы, предупреждающие износ трущихся деталей машин и снижающие потери на трение.

Более всего нуждается в смазочных системах станкостроительная, автомобильная и тяжелая промышленность.

Увеличение выпуска смазочных систем должно сопровождаться повышением их эффективности, что требует проведения научно-исследовательских разработок по конструктивному и технологическому совершенствованию производства основных узлов систем, создания поточных линий, улучшения планирования и использования экономических стимулов повышения производительности труда.

При этом большое внимание следует уделять использованию современных достижений трибологии. Смазочные системы должны обеспечивать режим ИП в узлах трения в такой степени, чтобы последние за весь период работы машины не выходили из полей допусков размера деталей узлов и потребляли минимум энергии на преодоление трения.

Смазочные системы должны использоваться в ряде машин. Среди них металлорежущие станки и кузнечно-прессовые машины, крупные приводные компрессоры, текстильные машины и станки, башенные краны и лифты, экскаваторы, бульдозеры, автогрейдеры, тракторы, магистральные локомотивы, грузовые автомобили и автобусы, комбайны и другие сельскохозяйственные машины. По экспертной оценке специалистов (разработчиков машин и смазочного оборудования, эксплуатационников), оснащению смазочными системами и многоотводными насосами, обеспечивающими точность и своевременность подачи смазочных материалов, подлежит до 85 % перечисленных выше машин и оборудования (около 2,5 млн. единиц).

Помимо рассмотренных ранее конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов долговечности машин считаем необходимым остановиться только на одном, наиболее важном вопросе, связанном со смазыванием деталей и развитием автоматизированных смазочных систем. Дело в том, что проблема смазывания является комплексной и включает вопросы смазочных и конструкционных материалов, а также смазочной техники.

Анализ тенденций развития трибологии и машиностроения позволяет сделать прогноз дальнейшего совершенствования смазывания:

1. Уменьшение номенклатуры минеральных смазочных материалов с почти полной заменой их высоколегированными синтетическими, разработка смазочных материалов, наносимых на поверхности трения один раз за весь ресурс узла трения;

2. Уменьшение номенклатуры конструкционных материалов, значительное снижение доли цветных металлов и повышение доли композиционных материалов с регулируемым рельефом, в том числе с нанесением на поверхности твердых покрытий или пропитыванием их смазочным материалом в количестве, достаточном для полного ресурса узла трения;
3. Автоматизация смазывания с обеспечением требуемой надежности и рационального расходования смазочного материала путем широкого применения индивидуальных для каждого узла трения адаптивных смазочных устройств, обеспечивающих рациональный режим смазывания, соответствующий режиму работы узла, в сочетании с надежным централизованным контролем состояния всех узлов;
4. Разработка и создание адаптивных смазочных устройств, которые будут представлять собой смазочный питатель, управляемый чувствительным элементом, реагирующим на изменение основных трибологических параметров пары трения (коэффициента трения и скорости или интенсивности изнашивания);
5. Разработка и применение централизованных комбинированных смазочных систем, управляемых микропроцессорами, автоматически изменяющими режим смазывания либо по заранее предусмотренной программе, либо в зависимости от состояния узлов трения, контролируемого соответствующими датчиками.

Проблему смазывания нельзя отделить от изучения взаимодействия смазочного материала с металлом и влияния на это взаимодействие структурных факторов металла и легирующих элементов смазочного материала. Исследование такого взаимодействия с определением сил трения и износостойкости пар трения позволит оптимизировать структуру и химический состав металла, состав компонентов смазочного материала.

Это научное направление, успешно развиваемое в последние годы и потребовавшее разработки новых физических методов исследования тонких поверхностных слоев металла (десятые доли микрометра), должно получить дальнейшее развитие в организациях, занимающихся созданием смазочных материалов и разрабатывающих износостойкие и антифрикционные сплавы. Результаты исследования будут положены в основу теории безызносности трущихся деталей.

Первые работы в этом направлении показали, что многие антифрикционные сплавы, применяемые в гидравлических системах, по составу компонентов не обеспечивают необходимого ресурса работы узлов трения насосов.

Наряду с научно-исследовательскими работами по изучению взаимодействия смазочных материалов с металлом предстоит разработка новых

конструкций смазочных систем, дальнейшее (в несколько раз) расширение их производства и определение областей целесообразного использования, включая машины массового применения: автомобили, тракторы, комбайны, строительно-дорожные машины и др.

6.6. Экономика и трибология

Конечные результаты исследований и разработок по трибологии должны обеспечивать снижение затрат труда на техническое обслуживание и текущий ремонт машин, снижение стоимости капитальных ремонтов, уменьшение расхода запасных частей, экономию горючего, смазочных материалов, снижение металлоемкости конструкций узлов трения и повышение производительности машины. В целом трибология должна способствовать решению узловых проблем экономики, относящихся к сырьевым, энергетическим и трудовым ресурсам страны.

Эти важные задачи потребуют в ряде случаев пересмотра планов научно-исследовательских работ, решения теоретических вопросов трения, изнашивания и смазывания машин.

Разработка научных программ по проблемам износостойкости диктуется экономической значимостью этой проблемы для народного хозяйства. Следует еще раз подчеркнуть, что износ является главной причиной снятия машин и оборудования с эксплуатации для проведения ремонта, и потери от этого могут быть сокращены рациональным применением способов, основанных на трибологии. Управление процессом изнашивания является центральным звеном таких проблем, как экономия энергии, сокращение расхода материалов, а также надежность и безопасность механических систем. Остановимся на указанных проблемах более подробно.

Проблема износостойкости в использовании ресурсов. Вопросы изнашивания оборудования тесно связаны с сохранением или экономией естественных ресурсов, жизненно важных для поддержания современного и будущего экономического роста. Потери материалов возникают, например на стадиях добычи, извлечения и очистки руды, на стадиях изготовления и ремонта изделий, а также когда изделия выбрасывают из-за морального износа или непригодности. Теряются денежные средства, энергия и труд. Значительная экономия может быть достигнута сокращением потерь на тех стадиях, где они особенно велики.

Повышение скоростных характеристик позволяет снизить габариты машины, но повышение скорости приводит к повышению температур, что снижает износостойкость деталей.

Ввиду большого потребления топлива легковыми и грузовыми автомобилями повышение КПД автомобильного транспорта особенно важно.

Повышение КПД двигателей на 4–5 % возможно путем снижения коэффициента трения между поршневыми кольцами и цилиндрами. Разработаны технологические процессы, которые позволяют снизить коэффициент трения в 2 раза. Это хромирование цилиндров двигателей с накаткой и применение ФАБО. Оба метода широко освещены в технической литературе.

Нельзя не упомянуть вопрос об уплотнениях. В основном уплотнения служат для изоляции узлов трения от окружающей среды. Во многих случаях их качество неудовлетворительно. Изоляция от пыли и воды еще представляет большую проблему при конструировании узлов трения многих машин и оборудования.

Проблема износостойкости и трудовых ресурсов. В связи с увеличением количества действующих машин и оборудования за последние годы во всех развитых странах возникла проблема специалистов для обслуживания и ремонта. Рост потока машин всюду опережает увеличение числа опытных механиков. Для подготовки механиков высокой квалификации необходимо несколько лет обучения и накопления опыта.

С каждым годом растет объем перевозок грузов автомобилями. По перевозке грузов (в тоннах) в нашей стране на автомобильный парк приходится около 70 %, а на железнодорожный транспорт 30 %. Однако стоимость перевозок автотранспортом дороже, чем по железной дороге. Очень велики затраты на обслуживание автомобилей и их ремонт. Здесь вопросы трибологии являются главными в снижении этих видов затрат. Анализ причин выхода из строя деталей, регулировка узлов трения, проведение смазочных работ, контроль технического состояния узлов трения — все это требует привлечения к работе опытных и высококвалифицированных специалистов. Здесь вопросы трибологии являются главным фактором в сокращении потребности в людских ресурсах.

Смазочные и регулировочные работы занимают более 50 % времени в техническом обслуживании автомобилей, 60 % – текстильного оборудования и до 40 % — самолетов. Применение металлоплакирующих смазочных материалов позволяет в 3 раза сократить такие затраты. Это один из примеров влияния трибологии на снижение затрат при техническом обслуживании машин и оборудования.

6.7. Создание безыносных узлов трения машин

До последнего времени генеральным направлением по борьбе с изнашиванием в машиностроении было повышение твердости трущихся поверхностей деталей. В промышленности разработано большое количество методов повышения твердости: цементирование, азотирование, хромирование, цианирование, поверхностная закалка, наплавка твердыми материалами и др.

Многолетний опыт свидетельствует, что это направление позволило повысить надежность трущихся деталей машин.

Например, электролитическое хромирование цилиндров двигателей внутреннего сгорания не только повышает износостойкость пары цилиндр – поршневое кольцо, но и в большей степени снижает потери на трение в цилиндропоршневой группе двигателей. Без азотирования или цементирования зубчатых передач в настоящее время нельзя обеспечить надежную работу тяжело нагруженных редукторов. Разработанные методы повышения твердости трущихся деталей явились мощным орудием в деле увеличения износостойкости деталей, а следовательно, и увеличения срока службы машин.

Однако постоянное стремление к уменьшению массы машин и повышению интенсификации рабочих процессов привело к увеличению давлений в узлах машин и скоростей скольжения и ухудшило условия смазывания. Кроме того, требования к повышению КПД механизмов, а также применение специальных смазочных материалов и жидкостей привело к тому, что традиционные методы увеличения износостойкости деталей повышением их твердости во многих случаях перестали себя оправдывать.

Площадь фактического контакта поверхностей деталей при высокой твердости материала в силу ряда причин (наличие возможного перекоса, большой шероховатости и волнистости поверхности) составляет очень малую долю номинальной поверхности трения. В результате на участках фактического контакта создаются громадные давления, что приводит к интенсивному изнашиванию поверхностей трения. В этом случае несмотря на малое значение адгезионной составляющей силы трения, пропорциональной площади фактического контакта, превалирующим оказывается механическое повреждение деталей.

В процессе поиска средств увеличения износостойкости деталей машин в нашей стране открыт ИП при трении. ИП – это комплекс физико-химических явлений на контакте поверхностей при трении, который позволяет преодолеть ограниченность ресурса трущихся сочленений машин и снизить потери на трение.

В ИП используются фундаментальные физико-химические процессы в отличие от трения при граничной смазке, где основой является механическое взаимодействие, а, например, такое мощное средство снижения износа и трения, как эффект Ребиндера, почти не используется.

ИП, его системы снижения износа и трения (системы СИТ), разработанные А.А. Поляковым, не вытекают из ранее имевшихся представлений о трении и изнашивании. Сложность ИП обуславливается как совокупностью различных химических и физико-химических процессов, так и системой взаимодействия этих процессов, носящих кибернетический характер. В связи с этим уместно сослаться на общую теорию систем, где указывается,

что традиционное разделение науки на классические дисциплины не удовлетворяет потребности современного научного познания, а сложные системы любого вида не поддаются адекватному описанию в рамках одной научной дисциплины. Процессы, составляющие сущность ИП, находятся, как правило, на стыках разделов химии, физической химии, физики, синергетики и механики.

Сложность ИП состоит также в том, что ряд его химических и физических процессов не встречался в практике исследований трения. К ним следует отнести процессы, происходящие при трении в сервоитной пленке, когда накопление дислокаций при ее деформировании поддерживается на некотором низком уровне, тем самым обеспечивая безызносность контактирующих поверхностей. К таким явлениям следует также отнести обратную связь между нагрузкой и силой трения, когда в определенном диапазоне нагрузок и скоростей скольжения их увеличение вызывает уменьшение силы трения. Большинство химических реакций ИП являются гетерогенными, поэтому их изучение затруднено.

Сервоитная пленка – защитная металлическая пленка, возникающая в начальной стадии трения в результате избирательного растворения анодных компонентов поверхностного слоя материала.

Электрические явления сопровождают все виды внешнего трения, так как процесс образования адгезионной связи между соприкасающимися поверхностями разнородных твердых тел приводит к образованию в контакте двойного электрического слоя. В ИП электрические явления играют определенную роль.

В начальной стадии ИП имеет место избирательное (электрохимическое) растворение в результате работы микроэлементов медного сплава, ускоренного механодинамическим действием трения. В результате на поверхности образуется слой меди – сервоитная пленка, которая пассивирует поверхность медного сплава. Начинает одновременно работать элемент медь – медь. На поверхностях трения возникают два одноименно заряженных слоя. Это обстоятельство имеет кардинальное следствие – возникает отталкивание этих слоев, снижающее адгезионное взаимодействие. Вступает в работу третий элемент, его действие заключается во втягивании в зазор положительно заряженных частиц. Напряженность поля и возникающая ЭДС могут достигнуть десятков миллионов вольт на 1 см, и в зазор будут втягиваться не только доли, но и частицы коллоидных размеров, т.е. появится электрофорез.

ИП имеет в своей основе описанные выше и другие полезные физико-химические явления и группы явлений (систем). Они подавляют изнашивание, снижают сопротивление сдвигу и обладают свойством самоорганизации, а иногда и способностью к обратной связи с возбуждающей причиной. Их основная ценность состоит в том, что они работают дифференцированно против

факторов, ведущих к разрушению поверхности. Почти каждая из систем имеет глубокое содержание, например, система защиты от водородного изнашивания представляет собой целое трибологическое направление, а диффузионно-вакансионный механизм снижения сопротивления сдвигу представляет собой новую физическую проблему трения, обуславливающую безызносность.

Традиционной системой снижения износа и трения является самопроизвольное образование слоя смазочного материала при трении с граничной смазкой в результате адсорбции молекул смазочного материала на поверхности. Имеются и другие данные использования физико-химических явлений для защиты от изнашивания и для снижения трения. Однако в ИП имеется максимальное число систем СИТ, и эффект здесь наиболее полный и существенный.

Явление ИП обусловлено термодинамическими системами трения. Свойства этих систем раскрыты И.Р. Пригожиным, который установил возможность высокой самоорганизации физических и химических систем при определенных термодинамических условиях. Трение является термодинамически неравновесным процессом, который может существовать как в области, близкой к равновесию, так и вдали от нее, образуя различные структурные классы, переход к которым осуществляется скачкообразно. В связи с этим возможно существование систем трения, не накапливающих энергии в виде скоплений дефектов в поверхностных слоях, а полностью передающих энергию во внешнюю среду. Примером такой системы является ИП.

Весьма полезным является свойство ИП работать в средах, где трение при граничной смазке не может эффективно выполнять свои функции. ИП проявляет способность перестройки защитных систем, которые варьируются в зависимости от свойств среды, являющейся исходным материалом для образования системы снижения износа и трения.

Для осуществления ИП в парах трения сталь – сталь, чугун – сталь и других, не содержащих пленкообразующего материала, используют металлоплакирующие смазочные материалы. Они содержат порошок пленкообразующего материала или окись металла, восстанавливаемого при трении, или металлорганическое соединение, выделяющее металл при разложении в зоне трения. При этом поверхностно-активные вещества должны содержаться в базовом смазочном материале или образовываться при распаде металлорганического соединения.

Металлоплакирующие пластичные смазочные материалы (например, на основе ЦИАТИМ-201), содержащие порошок бронзы или латуни, применяют в тяжело нагруженных узлах трения типа винт – гайка, где обычные смазочные материалы малоэффективны. Весьма перспективными являются жидкие металлоплакирующие смазочные материалы с добавками металлорганических

или комплексных соединений, работающие как в режиме ИП, так и в режиме граничной смазки.

В тех случаях, когда смазочным материалом является среда, не содержащая поверхностно-активных веществ (например, вода, водные растворы серной кислоты, солей), металлоплакирующая смазка переходит в ионную.

Ионная смазка основана на свойстве ионов металла, находящихся в растворе, втягиваться в зазор между поверхностями трения и разряжаться в зоне контакта, образуя разделительную пленку.

Износостойкость контактирующих в соляных и других агрессивных растворах поверхностей существенно возрастает, если в контакт ввести продукты деструкции пластмассы с помощью подпружиненных вставок или других конструктивных мероприятий. Такие вставки существенно увеличивают срок службы поверхностей трения в морской воде. Продукты деструкции твердой пластмассы ведут себя в контакте аналогично продуктам деструкции жидких углеводородов, т.е. вызывают окислительно-восстановительный процесс и образуют поверхностно-активные вещества, что существенно снижает интенсивность изнашивания.

Исследование механизма ИП, его закономерностей и областей рационального применения привело к некоторому изменению установившихся ранее взглядов на ряд вопросов трибологии: структуру и свойства тонких поверхностных слоев трущихся деталей машин, механизм изнашивания и смазочного действия, пути создания смазочных материалов и присадок к ним, оптимальную структуру и свойства износостойких и антифрикционных материалов прирабочных покрытий и др.

На основании рассмотренного можно считать, что ИП – особый вид трения, который обусловлен самопроизвольным образованием в зоне контакта неокисляющейся тонкой металлической пленки с низким сопротивлением сдвигу и неспособной наклепываться. На пленке образуется, в свою очередь, полимерная пленка, которая создает дополнительный антифрикционный слой.

ИП применен или опробован в различных машинах: самолетах (узлы трения шасси, планера), автомобилях (передняя подвеска), станках (направляющие, пара винт – гайка), паровых машинах (цилиндр – поршневое кольцо), дизелях тепловозов (цилиндр – поршневое кольцо), прессовом оборудовании (подшипники скольжения), редукторах (пара червяк – колесо), оборудовании химической промышленности (подшипники, уплотнения), механизмах морских судов (подшипники), магистральных нефтепроводах (уплотнения), электробурах (уплотнения), холодильниках (трущиеся детали компрессора), гидронасосах (узлы трения), нефтепромысловом оборудовании (узлы трения).

ИП применяется также в приборах (электрические контакты) и может быть использован для повышения стойкости режущего инструмента при сверлении, фрезеровании, протягивании, дорновании и резбонарезании.

Факторы, обуславливающие безызносность, следующие:

- контактирование поверхностей происходит через мягкий слой металла, основной металл испытывает пониженное (примерно в 10 раз) давление;
- металлическая пленка при деформации в процессе трения не наклёпывается и может многократно деформироваться без разрушения;
- трение происходит без окисления поверхностей, эффект Ребиндера реализуется в большей степени;
- продукты износа переходят с одной трущейся поверхности на другую и обратно, в зоне трения продукты износа удерживаются электрическими силами.

ИП позволяет: при изготовлении машин экономить металл (15...20 %) за счет большей грузоподъемности (в 1,5...2 раза) пар трения; увеличить срок работы машин (в 2 раза); сократить период приработки двигателей (в 3 раза) и редукторов (до 10 раз); сократить расход электроэнергии; в подшипниках скольжения и качения уменьшить расход смазочных материалов (до 2 раз); повысить КПД глобоидных редукторов с 0,7 до 0,85; винтовой пары с 0,25 до 0,5; увеличить экономию драгоценных металлов (золота, платины, серебра) в приборах в 2–3 раза за счет большей надежности электрических контактов.

Дальнейшее развитие работ по созданию практически не изнашиваемых узлов трения машин, оборудования и приборов с использованием ИП – одна из важнейших проблем современной трибологии на основе самоорганизации.

6.8. Защита деталей машин от водородного изнашивания

Важной задачей трибологии является разработка методов борьбы с водородным изнашиванием. Несколько лет назад в России экспериментально обнаружено неизвестное ранее явление концентрации в поверхностных слоях трущихся деталей водорода, выделяющегося из материалов пары трения и из окружающей среды (смазочного материала, топлива, воды и др.). Это явление вызывает ускорение изнашивания.

Водородное изнашивание характеризуется рядом процессов в узлах трения машин:

1. Интенсивным выделением водорода в результате трибодеструкции водородсодержащих материалов, ускоряемым механохимическим действием;

2. Диффузией водорода в деформируемый слой стали; скорость диффузии определяется градиентами температур и напряжений, что создает эффект накапливания водорода в процессе трения;
3. Особым видом разрушения, связанным с одновременным появлением большого числа «зародышей» трещин по всей зоне деформирования, и упомянутым эффектом накапливания водорода.

Водородное изнашивание не имеет общих черт с водородной хрупкостью стали ни по источникам наводороживания, ни по интенсивности и характеру распределения водорода в стали, ни по характеру разрушения, поскольку он связан только с процессом трения и обусловлен им. Для водородного изнашивания характерны высокая локальная концентрация водорода в поверхностном слое стали, возникающая вследствие больших градиентов температуры и напряжений при трении, которые обуславливают явление накапливания и особый характер роста трещин, приводящий к сплошному разрушению слоя. Водородное изнашивание вносит новые представления о механизме хрупкого разрушения.

Защита от водородного изнашивания имеет особое значение для следующих отраслей:

1. Авиационной техники (узлы трения топливных насосов, а также тормозные колодки и барабаны колес выходят из строя в результате водородного изнашивания);
2. Железнодорожного транспорта (повышение скоростей поездов связано с созданием более эффективных тормозов); попытка использования пластмассовых тормозных колодок желаемых результатов не дала вследствие усиленного водородного изнашивания бандажей колес; водородному изнашиванию подвергаются рельсы и колеса вагонов;
3. Автомобильного транспорта (водородное изнашивание резко снижает срок службы цилиндров и поршневых колец двигателей, тормозных накладок, тормозных барабанов и дисков сцепления, а также лопаток бензиновых насосов и других деталей агрегатов автомобилей);
4. Морского флота (водородному изнашиванию подвергаются узлы трения, смазываемые водой, например, подшипники гребных валов судов и др.);
5. Деревообрабатывающей промышленности (водородное изнашивание деревообрабатывающего инструмента и рабочих органов машин сдерживает рост производительности труда в отрасли);
6. Техники, используемой на севере страны (одной из причин быстрого изнашивания машин, работающих на севере, является охрупчивающее действие водорода, который при низких температурах не растворяется в поверхностных слоях, а концентрируется между зоной трения и объемом

материала трущейся детали вследствие значительного перепада температур);

7. Химического машиностроения (узлы трения машин и оборудования химической промышленности изнашиваются главным образом в результате действия водорода);
8. Техники будущего (в новых машинах расширяется применение титана и его сплавов; при трении эти материалы, обладая низкими антифрикционными свойствами, весьма сильно поглощают водород и подвергаются водородному изнашиванию).

При ведущейся в России и США широкой работе по созданию двигателей для автомобилей и самолетов на водородном топливе исследователи должны заранее принять меры защиты деталей от водородного изнашивания.

Проблема водородного изнашивания имеет комплексный межотраслевой характер и поэтому требует привлечения к ее решению ученых различных специальностей (металловедов, физиков, химиков, специалистов по триботехнике) и должна решаться по единому плану.

6.9. Расширение применения финишной антифрикционной безабразивной обработки трущихся деталей

Как известно, износостойкость зависит от окончательной (финишной) технологической обработки поверхностей деталей. Имеются обширные экспериментальные исследования по влиянию шероховатости поверхностей трения на интенсивность изнашивания деталей. Для широко распространенных сочленений выявлены оптимальные значения параметра шероховатости, при которых износ деталей минимален. Установлено, что от финишной обработки деталей зависит не только первоначальный (прирабочный) износ, но и установившийся износ, т.е. первоначальная приработка может влиять на интенсивность изнашивания при длительной эксплуатации машин.

В последние годы разработаны новые технологические процессы финишной обработки деталей, которые позволяют снизить прирабочный износ деталей и повысить антифрикционные свойства сочленения (улучшить смазку деталей, снизить коэффициент трения). К таким методам можно отнести вибрационную обработку поверхностей трения и алмазное выглаживание.

Например, окончательную обработку зеркала цилиндра двигателей внутреннего сгорания производят хонингованием, перед которым цилиндры шлифуют, развертывают или растачивают. Хонингование проводят в несколько этапов.

Этот процесс может обеспечить требуемую шероховатость поверхности зеркала цилиндра и определенную направленность выступов неровностей (выступы направлены под определенным углом к оси зеркала цилиндра),

которые создают наилучшие условия удержания смазочного материала на рабочей поверхности.

Однако при этом обрабатываемая поверхность в большей или меньшей степени насыщается абразивом хонов; несмотря на последующую продувку цилиндра сжатым воздухом, абразивные частицы остаются на рабочей поверхности и в труднодоступных местах (в стыках неподвижных посадок и т.п.). Эти частицы в процессе работы вымываются маслом и вызывают повышенный износ деталей. То же относится и к обработке шеек коленчатых валов.

В связи с изложенным крайне необходима разработка нового технологического метода окончательной обработки деталей, при котором вообще исключалась бы абразивная обработка поверхности. К таким методам относится ФАБО. Малая производительность прежней оснастки ограничивала применение этого метода, в последние годы было проведено исследование по применению ФАБО для обработки зеркала цилиндра двигателя внутреннего сгорания. Новая высокопроизводительная оснастка и химические составы обеспечивают высокое качество антифрикционного покрытия.

Существует принципиальная разница в переносе материала при ИП и ФАБО. При ИП в случае трения бронзы по стали в среде глицерина или ЦИАТИМ-201 из твердого раствора бронзы происходит выделение атомов меди.

Атомы легирующих элементов, растворяясь, уходят в смазочный материал, атомы меди, соединяясь в группы, переносятся на сталь. Этот процесс происходит медленно, за многие (не за один–два) проходы. При ФАБО состав перенесенного материала не отличается от исходного. Материал переносится крупинками, которые прочно схватываются со сталью и имеют между собой определенную связь. Детали, подвергаемые ФАБО, могут быть шлифованы, развернуты, проточены или хонингованы. Шероховатость поверхности должна быть в пределах $Ra = 2,5 \dots 1,25$ мкм.

Преимущество ФАБО перед другими финишными операциями состоит в том, что этот метод чрезвычайно прост и не требует сложного оборудования. ФАБО придает стальной или чугунной поверхности высокие антифрикционные свойства. После ФАБО цилиндр двигателя внутреннего сгорания как бы превращается на первый период работы в бронзовый, коэффициент трения между поршневым кольцом и зеркалом цилиндра уменьшается в 2 раза. Это может существенно отразиться на мощности двигателя.

Опыт использования ФАБО для цилиндров двигателя показал большое преимущество этого метода по сравнению только с одним хонингованием. Износостойкость цилиндров и поршневых колец возросла в 1,4 раза.

Шейки коленчатых валов также целесообразно подвергать ФАБО, поскольку они и сопрягаемые с ними вкладыши лимитируют время приработки двигателей и часто подвергаются ремонтам. В этом направлении предстоят исследовательские работы.

Опыт применения ФАБО колес железнодорожного транспорта свидетельствует о целесообразности его применения в более широких масштабах.

6.10. Трибология, интересы здоровья и охраны окружающей среды. Пути решения экологических проблем

Этот вопрос к настоящему времени находится еще в стадии постановки, однако можно утверждать, что трибология имеет непосредственное отношение к здоровью людей и охране окружающей среды.

Более 70 % загазованности больших городов нашей страны вызвано автомобильным транспортом. Это происходит в результате большой изношенности цилиндропоршневой группы двигателей автомобилей, падением их мощности и в связи с этим высоким потреблением ими топлива, смазочных материалов и малым ресурсом. Большинство наших автомобилей до настоящего времени не снабжены нейтрализаторами отработавших газов.

Использование асбестосодержащих накладок в тормозах автомобилей, наличие паров топлива в кабинах транспортной техники, повышенные вибрации и шумы в машинах в результате износа подшипников, биение валов, зубчатых передач – все эти и им подобные недостатки, относящиеся к низкому уровню решения вопросов трибологии, оказывают существенное влияние на здоровье обслуживающего персонала и население города.

Причинами крупных аварий и катастроф были утечки через уплотнения взрывоопасных продуктов, задиры и повышенный износ ответственных трущихся деталей, разрушение контактных поверхностей подшипников, рельсов, бандажей колес, поломки зубьев шестерен, заклинивание плунжерных пар и т.п.

Развитие диагностических средств узлов трения машин и механизмов исключит возможность работы на неисправных машинах, а также снизит травматизм и другие последствия.

Многие стороны рассматриваемого вопроса будут решаться не только в рамках отдельных стран, но и в международном масштабе. Так, в морских портах установлен строгий контроль судов, загрязняющими морские воды смазочным маслом; судно в этом случае подвергается штрафу. Как известно, такого рода загрязнения вызваны нарушениями уплотнений в двигателе, течью масла в забортных механизмах в результате износа или повреждений уплотнений.

Принимаются меры по более строгому контролю автомобилей, загрязняющими воздушную среду отработавшими газами. Двигатели автомобилей с изношенными цилиндрами и поршневыми кольцами, как уже упоминалось, не только потребляют больше топлива, но и значительно увеличивают загазованность городов и поселков.

Недостаточная износостойкость уплотнительных устройств, перегрев подшипников, износ валов часто вызывают течи масла, топлива, рабочей жидкости гидравлических систем. Все это приводит к непроизводительному потреблению энергии, порче асфальтовых покрытий и уничтожению растительности.

Непредусмотренный ремонт машин в пути, проведение технического обслуживания машин в полевых условиях приводит к загрязнению окружающей среды отходами масла, промасленной ветошью, к потерям топлива и т.п.

В публикациях последних лет по трибологии отмечается необходимость более широкого использования новых разработок, основанных на базе эффекта безызносности при трении и водородном изнашивании металлов: новых металлоплакирующих смазочных материалов, ФАБО и безразборного восстановления двигателей внутреннего сгорания. Применение таких технологий позволяет следующее:

- снизить загазованность атмосферы при работе автомобилей в 2–5 раз;
- сократить расход смазочных материалов в 2–5 раз и топлива до 3...7 %; повысить ресурс автомобильного двигателя в 1,5–2 раза;
- повысить надежность узлов трения и, тем самым, уменьшить аварии машин;
- во многих случаях заменить капитальные ремонты машин на ремонты без разборки.

Снижение выброса в окружающую среду отработанных картерных масел. Необходимо обратить особое внимание на попадание в окружающую среду отработанных картерных масел двигателей внутреннего сгорания и методов их утилизации. Проблема высокой концентрации многочисленных канцерогенных веществ (включая бензопирены) в отработанных картерных маслах может стать более серьезной, чем проблема выхлопных газов автомобилей. Приведем некоторые цифры по экономике и расходу масел.

В индустриально развитых странах приблизительно 4,5 % валового национального продукта расходуется на трение, износ и коррозию подвижных сочленений технических изделий. Это приводит к потерям сырьевых материалов и энергии общей стоимостью несколько сотен миллиардов долларов ежегодно во всем мире. Смазка составляет только 1 % от общего расхода

продуктов из минеральных масел. Но из-за неполного использования применение смазки создает потенциальную проблему для окружающей среды.

Использование масла колеблется от 20 % для турбин и трансмиссий до 100 % для масел, применяемых в двигателях, работающих на горючей смеси (смесь топлив с маслом).

В странах Европейского союза общая продажа смазки составляет около 4,5 млн. т в год, из них полностью используется только половина. Это немногим больше 2 млн. т, которые расходуются следующим образом: 750 000 т – как топливо, почти 700 000 т – перерабатывается, 600 000 т – неконтролируемо исчезает в окружающую среду. Эти последние 600 000 т и представляют все возрастающую опасность.

Такие цифры для России не поддаются учету, однако рассматриваемая проблема в силу ряда причин для России, еще более значительна.

В настоящее время существуют полностью разлагаемые масла для топливной смеси и стандартизован метод Европейского координационного совета по разработке методов испытаний (СЕС-L-33Т-82) для оценки и сравнения степени разложения их под действием бактерий, а также параметры, которые можно измерять и контролировать.

Наибольшую опасность для окружающей среды представляют моющие присадки к маслам, что вызывает увеличение количества загрязняющих примесей и накопление их в масле при картерной смазке. Среди этих загрязнений – полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) с сильно выраженными канцерогенными свойствами.

При картерной смазке в используемом масле обнаружено около 140 различных ПАУ. Они присутствуют и в свежем масле, но в гораздо меньших количествах, ПАУ образуются в основном из топлива и в процессе сгорания. При низкой концентрации ПАУ в топливе их концентрация в масле также очень мала.

Концентрация бензопирена в смазочном масле при картерной смазке двигателей с принудительным зажиганием для пассажирских автомобилей возрастает со скоростью примерно в 10 раз большей, чем дизельных двигателей. Для грузовых автомобилей и автобусов никакого увеличения концентрации ПАУ в смазочном масле не обнаружено.

Попадание масла в окружающую среду при картерной смазке происходит непосредственно с выхлопом, с твердыми частицами в выхлопных газах, путем утечки и при смене масла. По мере износа поршневых колец и цилиндров все большее количество масла попадает в окружающую среду с выхлопом.

Результаты исследований показывают, что концентрация канцерогенных ПАУ в масле двигателей внутреннего сгорания составляет: картерная смазка,

двигатель с искровым зажиганием 270...400 мг/км; картерная смазка, дизельный двигатель 20...30 мг/км; двигатель с искровым зажиганием, работающий на топливной смеси 0,2...0,4 мг/км.

При смене масла высококвалифицированным механиком в хорошо оборудованном гараже только очень небольшое количество масла попадает в окружающую среду. Однако 10...15 % от всех замен масла проводятся любителями, которые, игнорируя предупреждения, помещают масло в бытовые отходы, сливают в сточные воды или просто выливают.

Отходы отработанного масла имеют тенденцию накапливаться, что видно в местах стоянок, гаражах и на центральных участках высокоскоростных дорог, особенно когда на дороге есть уклон. При выпадении осадков ПАУ, содержащиеся в масле, достигают сточных труб, попадают в реки, озера, оседают в донных отложениях. Очень часто отработанное масло у автолюбителей просто не принимается, что вынуждает последних избавляться от него любыми путями.

Очень опасно использовать отработанное картерное масло для цепных пил. Мутагенность топливной смеси, состоящей из 1 л картерного масла и 2...3 л топлива, на 4 порядка выше, чем выхлопной эмиссии двигателей цепных пил.

Применение топливной смеси должно быть рассмотрено при конструировании новых двигателей внутреннего сгорания, а также тех двигателей, которые традиционно до сих пор оборудованы картерной смазкой. Этот вопрос должен встать перед правительствами промышленных стран, заботящихся об экологии.

Большое внимание необходимо уделять канцерогенным веществам при износе деталей тормозов. Асбест в течение многих лет являлся одним из главных компонентов фрикционных материалов. Он обладает рядом уникальных свойств: большая механическая прочность, высокий коэффициент трения, низкая тепло- и электропроводность, химическая стойкость, доступность в цене.

В последние годы сначала в США, а затем в Западной Европе резко усилилась кампания, направленная на повсеместный запрет асбеста и замену его искусственными минеральными волокнами. В России ведутся работы по поиску заменителей асбеста в составе тормозных изделий. Для наиболее нагруженных тормозов самолетов применяются углеродные материалы. Проводятся исследования по определению допустимого содержания асбеста в тормозных деталях.

Помимо асбеста для улучшения трибологических показателей фрикционных тормозов в композициях для изготовления тормозных накладок применяется ряд добавок – сульфиды, например дисульфид молибдена, дисульфид титана, сульфид свинца, сульфид сурьмы и сульфид олова.

Разложение этих сульфидов металлов преимущественно происходит при температурах ниже 500 °С. Однако обнаружено, что при тяжелых условиях торможения температура поверхности тормозных дисков превышает 800 °С. Некоторые сульфиды металлов при этом разрушаются с образованием оксидов металлов. Например, дисульфид титана при разложении образует на рабочих поверхностях тормоза слой из двуокиси титана.

Этот слой обладает очень высокой износостойкостью и предохраняет металлический основной материал от сильного износа (возможно от проникновения диффузионно-способного водорода).

Таким же образом действует и дисульфид сурьмы. При разложении дисульфида олова получается металлическое олово и вместе с другими металлами с низкой точкой плавления, например с цинком и медью, образует на поверхности тормозных дисков припаянное покрытие из сплавов. Благодаря такому сплаву значительно улучшается распределение тепла по поверхности, повышается износостойкость тормозных дисков и снижается образование трещин на поверхности дисков.

Однако трисульфид сурьмы и оксид свинца признаны токсичными веществами, и поэтому возникла необходимость исключить эти сульфиды металлов из современных композиций для изготовления тормозных накладок.

В качестве твердых смазок для тормозных накладок чаще всего применяют графит. Трибологические свойства графита подвержены влиянию влажности, что ограничивает его применение. Коэффициент трения и износостойкость при различных скоростях и давлениях различны, поскольку влажность понижается при увеличении температуры поверхности, у дисульфида молибдена этого не наблюдается. Поверхность молибдена обладает определенной полярностью, что придает этой твердой смазке ценные свойства.

Р. Робски разработана технология, по которой чешуйки графита покрываются неорганическим веществом, придающим графиту полярность.

Поскольку поляризованный графит образован из графита и неорганического поляризующего агента, например молибдатов, фосфатов и сульфатов, эту новую добавку можно считать экологически чистой добавкой для композиций тормозных накладок. Образование токсичных продуктов при разложении композиций не обнаружено.

Поляризованный графит в качестве добавки к композициям для тормозных накладок применяется в смесях для накладок легковых, грузовых автомобилей и железнодорожных колодок.

К сказанному следует добавить, что теоретическое обоснование к положительному действию поляризации на контакте следует искать еще в целенаправленном движении образующегося водорода. Такая идея была

высказана В.И. Колесниковым при изучении им водородного износа тормозных колодок железнодорожного транспорта.

6.11. Подготовка инженерных кадров по трибологии

Для успешного развития любой науки нужны научные и инженерно-технические кадры. Необходимо организовать подготовку специалистов по трибологии в высших и средних учебных заведениях машиностроительного профиля, а также в институтах повышения квалификации в отраслях промышленности.

Отсутствие знаний по трибологии с учетом новых направлений в ее развитии порой приводит к тому, что некоторые инженеры, даже имеющие опыт ремонта машин, а порой и научные работники смежных специальностей, не зная существа предмета, истории его развития и не имея опыта проведения научно-исследовательских работ, берутся решать важные вопросы трибологии, но не достигают положительных результатов.

Неправильный выбор смазочного материала, покрытия, конструкции деталей или технологии их изготовления, а также неполный учет условий эксплуатации, приводившие к серьезным последствиям и большим экономическим потерям, являются причиной неудовлетворительных знаний инженерным составом вопросов трибологии.

Опыт преподавания трибологии в вузах подтверждает необходимость широкой популяризации достижений трибологии, глубокого изучения ее разделов, взаимной информации и обмена опытом. Для решения важных задач по трибологии в масштабах такой огромной отрасли, как машиностроение, особенно при создании новых высокопроизводительных машин, требуется основательная подготовка специалистов по трибологии.

Без знаний по трибологии нельзя на должном уровне разработать фрикционный материал для тормоза, сконструировать двигатель внутреннего сгорания, изготовить сельскохозяйственную машину, разработать смазочный материал для автомобиля, отремонтировать металлообрабатывающий станок, испытать новый турбобур. В этих и многих других вопросах требуется активное участие специалистов, и именно специалистов по трибологии.

В США, Великобритании, ФРГ, Франции, Польше и некоторых других зарубежных странах уже длительное время ведутся работы по подготовке специалистов по трению, изнашиванию и смазке машин. В одних странах инженерные кадры по трибологии готовят на специальных факультетах повышения квалификации (Польша), в других – путем специализации студентов в высших учебных заведениях (ФРГ), в Великобритании подготовка кадров по трибологии ведется в университетах. Так, обучение студентов трибологии в Высшей технической школе (г. Хемниц) проходит по 10 спецкурсам, общий объем программ составляет 400 ч, в программах большое

место отведено изучению новых методов повышения износостойкости деталей с уклоном на технику смазки. Отдельным курсом читается трибофизика и трибохимия.

Программа обучения студентов трибологии содержит следующие дисциплины: проектирование смазочных устройств; испытательные станции смазочных устройств; основы трибологии; методы расчета и конструирования в технике смазывания; средства рационализации в трибологии; оценка эксплуатационных свойств пар трения; транспорт и транспортирующие устройства; физические и измерительно-технические основы проблем трения и изнашивания; расчет трубопроводов и смазочной аппаратуры; прикладная химия смазочных материалов. В программу курса включена лекция, имеющая целью воспитание экономического мышления и бережного отношения к народному достоянию, а также развитие навыков комплексного изучения дисциплин, на которых основана наука о трении и изнашивании.

Обучение построено таким образом, что выпускники данной специализации могут быть использованы во всех отраслях промышленности, а также в сооружении энергоустановок, химических установок, в приборостроении и в области транспортных средств.

Во Франции трибологию преподают как самостоятельную дисциплину уже более 30 лет. Ранее трение и смазка преподавались как составная часть курсов по физике, химии и металлургии. Впервые курс трибологии был введен проф. Р. Куртелем в спецшколе двигателей внутреннего сгорания при сотрудничестве с французским Институтом нефтехимии. В настоящее время практически во всех машиностроительных политехнических колледжах Франции введен курс или читаются лекции по трибологии. В некоторых университетах также читаются курсы по трибологии.

В России курсы по трибологии читают во многих вузах: в Москве, Пензе, Брянске, Саратове, Ростове-на-Дону, Красноярске, Омске, Томске, Владивостоке, Нижнем Тагиле, Ухте и др. Однако инженерные кадры по трибологии выпускаются лишь в семи университетах страны.

Учитывая важность подготовки специалистов по трибологии, целесообразно ввести преподавание курса «Трибология и триботехнологии» во всех машиностроительных вузах России.

Примерная тематика такого курса, разработанная и читаемая уже на протяжении многих лет в МГТУ им. Н.Э. Баумана, приведена далее.

1. *Основы прочности поверхностного слоя деталей машин.* Качество поверхности, физико-химические свойства и контактирование деталей; виды трения в узлах машин; механизм изнашивания деталей пар трения и рабочих органов машин; виды разрушения рабочих поверхностей деталей; водородное изнашивание; эффект безызносности, его механизм и

закономерности.

2. *Конструктивные факторы повышения долговечности и надежности работы узлов трения машин.* Вопросы выбора материалов для узлов трения; расположение материалов в парах трения; жесткость, податливость и специальная конфигурация деталей как фактор повышения износостойкости пар трения; принципы взаимного дополнения качества; конструктивные решения узлов трения, обеспечивающие высокую долговечность; смазка узлов трения; расчет типовых узлов трения на износ.
3. *Технологические методы обработки трущихся деталей.* Влияние точности размера, микрогеометрических отклонений и взаимного расположения деталей на износ; термическая, химическая и химико-термическая обработки деталей; гальванические покрытия поверхностей деталей; наплавка поверхностей деталей; поверхностное пластическое деформирование и выглаживание поверхностей; покрытия, нанесенные фрикционным методом и методом напыления; упрочнение поверхностей лазерным лучом, взрывом, ионной имплантацией; финишная антифрикционная безабразивная обработка поверхностей стальных и чугунных деталей.
4. *Эксплуатационные мероприятия по обеспечению надежности и долговечности узлов трения машин.* Смазка машин в процессе эксплуатации, обкатка машин, стендовые и эксплуатационные испытания. Металлоплакирующие смазочные материалы. Влияние режима работы машины на износ деталей; исследование технического состояния узлов трения на разных этапах эксплуатации машин; методы раннего обнаружения износа узлов трения машин в эксплуатации. Упреждающий ремонт, ремонт по состоянию, диагностирование механизмов и машин. Безразборное восстановление изношенных пар трения.

По курсу предусматривается проведение лабораторных и практических занятий, семинаров и занятий по обмену опытом. Изучение курса заканчивается сдачей экзамена (зачета), выполнением курсовой работы или домашнего задания.

Помимо подготовки инженерных кадров по трибологии необходимо организовать подготовку или переподготовку специалистов среднего звена. Для этого следует проводить курсы по изучению смазочного хозяйства на предприятиях, ремонта узлов трения, новых методов повышения износостойкости деталей и других вопросов трибологии. Эти же вопросы должны быть в центре внимания при проведении учебы с инженерно-техническими работниками в производственных объединениях, комбинатах, на заводах и фабриках. Для этого необходимо иметь оснащенные учебные лаборатории, учебники, учебные и наглядные пособия, образцы изношенных деталей, восстановленных различными технологическими способами.

Вопросы подготовки и повышения квалификации кадров по трибологии необходимо решать незамедлительно. Это окажет серьезное влияние на качество будущих машин, их долговечность, на экономию топлива и смазочных материалов, черных и дефицитных цветных металлов, на экологию промышленных районов России.

Список литературы

1. Автоматизированные смазочные системы и устройства / В.Я. Семенов, П.М. Курганский, В.И. Кузьмин. М.: Машиностроение, 1982.
2. Аксенов А.Ф., Лозовский В.Н. Износостойкость авиационных топливно-гидравлических агрегатов. М.: Транспорт, 1986.
3. Бабель В.Г. Повышение термоокислительной стабильности масел с металлоплакирующими присадками // Междунар. конгресс «Защита-95». М.: Академия нефти и газа им. И.М. Губкина, 1995.
4. Гаркунов Д.Н. Триботехника. Износ и безызносность : учебник для вузов. М.: Изд-во МСХА, 2001.
5. Гаркунов Д.М. Триботехника. Конструирование, изготовление и эксплуатация машин: учебник для вузов. М.: Изд-во МСХА, 2002.
6. Гаркунов Д.Н. Научные открытия в триботехнике. Эффект безызносности при трении. Водородное изнашивание металлов. М.: Изд-во МСХА, 2004.
7. Гаркунов Д.Н., Суранов Г.И., Хрусталеv Ю.А. Триботехника. Водородное изнашивание деталей машин : учеб. пособие. М.: Изд-во МСХА, 2007.
8. Гаркунов Д.Н., Корник П.И. Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин. М.: Изд-во МСХА, 2003.
9. Дюргеров Н.Г. Технологические методы восстановления и повышения износостойкости деталей машин : учеб. пособие: в 2-х ч. / под ред. В.И. Колесникова. Ростов н/Д, 2006.
10. Елизаветин М.А., Сатель Э.А. Технологические способы повышения долговечности машин. М.: Машиностроение, 1979.
11. Защита от водородного износа в узлах трения / под ред. А.А. Полякова. М.: Машиностроение, 1980.
12. Избирательный перенос в тяжело нагруженных узлах трения / под ред. Д.Н. Гаркунова. М.: Машиностроение, 1982.
13. Исаченков ЕМ. Контактное трение и смазки при обработке металлов давлением. М : Машиностроение, 1978.
14. Короткое А.В. Износостойкость машин: учеб. пособие. Уральский гос. техн. ун-т - УПИ, 2006.
15. Колесников В.И. Теплофизические процессы в металлополимерных системах. М.: Наука, 2003.
16. Мельников ЭЛ. Справочник по холодной штамповке оболочковых деталей.

М.: Машиностроение, 2003.

17. Орлов П.И. Основы конструирования. Справочно- методическое пособие: в 2 кн. М.: Машиностроение, 1988.
18. Поверхностная прочность материалов при трении / под ред. Б.И. Костецкого. Киев: Техшка, 1976.
19. Пашковский ИЗ. Технологические методы защиты деталей бытовых машин и оборудования сервиса от водородного изнашивания. Моск. гос. ун-т сервиса, 2004.
20. Пичугин В.Ф. Избирательный перенос в узлах трения: учеб. пособие. М.: Моск. гос. ун-т нефти и газа им. И.М. Губкина, 2005.
21. Поляков А.А., Рузанов ФИ. Трение на основе самоорганизации. М : Наука, 1992.
22. Польцер Г., Майснер Ф. Основы трения и изнашивания: пер. с нем. М.: Машиностроение, 1984.
23. Пригожин И. От существующего к возникающему: пер. с англ. / под ред. Ю.Л. Климонтовича. М.: Наука, 1985.
24. Прокопенко А.К. Избирательный перенос в узлах трения машин бытового назначения. М.: Легпромбытиздат, 1987.
25. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. М.: МГТУ им.Н.Э. Баумана, 2002.
26. Решетов Д.Н. Детали машин. Конструкционная прочность. Трение, износ, смазка. Т. IV / под ред. К.В. Фролова. М.: Машиностроение, 1995.
27. Рыбакова Л.М., Куксенова ЛИ. Структура и износостойкость металла.М.:Машиностроение, 1982.
28. Рыжкин А.А. Теплофизические процессы при изнашивании инструментальных режущих материалов. Ростов н/Д : Донской гос. техн. ун-т. 2005.
29. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин/В.Д. Зозуля [и др. Киев] : Наука, 1990.
30. Соколов А.И., Тищенко Н.Г., Аметпов В.А. Оценка работоспособности машин по параметрам работающего масла: учеб. пособие. Томск: Томскийгос. ун-т, 1991.
31. Стрельцов В.В., Попов В.Н., Карпенков В.Ф. Ресурсосберегающая ускоренная обкатка отремонтированных двигателей. М.: КолосС, 1995.

32. Суранов Г.И. Уменьшение износа деталей автотракторных двигателей при пуске. 2-е. изд. Зеленоград: Перит-А, 2000.
33. Трение и износ в экстремальных условиях : справочник / Ю.Н. Дроздов, В.Г. Павлов, В.Н. Пучков. М.: Машиностроение, 1986.
34. Трение, изнашивание и смазка: справочник: в 2 т./ под ред. И. В. Крагельского и В.В. Алисина. М.: Машиностроение, 1978.
35. Трибологические основы повышения ресурса машин (вопросы и ответы): учеб. пособие / под ред. Д.Н. Гаркунова. Московский гос. агроинженерный ун-т им. В.П. Горячкина, 2003.
36. Хайнше Г. Трибохимия. М.: Мир, 1987.
37. Хаккен Г. Синергетика. М.: Мир, 1985.
38. Шпеньков Г.П. Физикохимия трения / под ред. Д.Н. Гаркунова. Минск: Белорусский гос. ун-т, 1978.

Заключение

Создание научной школы и публикации. Открытия эффекта безызносности и водородного изнашивания металлов послужили началом создания новой научной школы в области триботехники из специалистов не только России, но и на Украине, в Белоруссии, Казахстане, Германии, Польше, Литве, Болгарии и Монголии. Особенностью этой школы является то, что в нее вошли научные работники разных специальностей: металловеды, химики, физико-химики, механики, специалисты-трибологи отдельных отраслей промышленности: авиационная техника, морской флот, железнодорожный транспорт, станкостроение, автомобильный транспорт, сельскохозяйственная техника, приборостроение, химическая и нефтегазовая промышленности.

В 1992 г. в Академии проблем качества РФ было организовано отделение «Проблемы безызносности машин и механизмов». Это отделение и взяло на себя обязанности руководства созданной научной школы по трем основным направлениям:

- исследования механизмов безызносного трения и водородного изнашивания металлов и их закономерностей;
- разработка методов повышения износостойкости деталей машин и механизмов на основе эффекта безызносности и изучения водородного изнашивания металлов; оценка их эффективности и использование в практике;
- подготовка инженерных и научных кадров в области триботехники.

Отделение «Проблемы безызносности машин и механизмов» Академии проблем качества издавало до 2004 г. научно-инженерный журнал «Эффект безызносности и триботехнологии». Ряд номеров журнала были изданы на английском и немецком языках. Это наиболее полный источник информации о состоянии исследований в области эффекта безызносности при трении и водородном изнашивании металлов и использовании научных разработок на их основе в различных отраслях техники.

Помимо журнала издательством «Машиностроение» было выпущено 5 сборников статей по эффекту безызносности и водородному изнашиванию металлов под названием «Долговечность трущихся деталей машин», а также несколько книг, посвященных указанным открытиям. К настоящему времени опубликовано более 2000 печатных статей, 52 сборника и монографий, проведено 46 семинаров и конференций. Специалистами школы защищено свыше 70 кандидатских и 20 докторских диссертаций. Ряд книг и брошюр были изданы в Германии, Польше, Болгарии.

Новое в теоретических положениях трибологии на основе самоорганизации. Установлено, что поверхностный слой (в виде сервовитной

и серфинг-пленок) при трении представляет диссипативную структуру со всеми ее особенностями: гомогенная среда, наличие фазового кинетического перехода (переход от консервативного движения дислокаций к переползанию), обмен энергией и веществом с внешней средой (образование и распад комплексных соединений в смазке), высокое отклонение от равновесия (растворение легирующих элементов), ускорение потоков диффузии при пластической деформации. Благодаря этим процессам диссипативная структура поверхностного слоя может существовать без финального исхода.

Таким образом, трение из разрушительного процесса при граничной смазке, в условиях безызносности, превращается в созидательный и его можно представить как самоорганизующееся явление неживой природы со свойствами, напоминающими функции работы сустава живого организма. В этом случае при трении уровень деструкции материала, при котором происходит износ, не достигается из-за периодической разрядки дислокаций на поверхности и аннигиляции с вакансиями. Способность дислокационной системы к эволюции и кинетическому фазовому переходу на другой тип движения связана с природой материала и активной добавкой к смазочному материалу, т.е. созданием особых условий.

Отметим, что природа безызносности была установлена не сразу, а благодаря разработке и применению новых методов исследования поверхностей трения и привлечения к анализу явлений физики пластичности поверхностных слоев, теории коррозии и пассивации, химии координационных соединений и теории самоорганизации.

Массоперенос при обычном трении повышает износ или делает сопряжение неработоспособным. При эффекте безызносности это явление снижает или полностью исключает изнашивание поверхности трения.

Разработаны теоретические основы создания к смазочным материалам маслорастворимых добавок, с использованием металлов переменной валентности, обеспечивающих реализацию в узлах трения эффекта безызносности.

Теоретически обосновано и экспериментально доказано, что введение соединений металлов переменной валентности в смазочные материалы может в значительной степени повысить антиокислительные свойства их и, как следствие, повысить их срок службы.

Установлен новый вид износа деталей — водородное изнашивание. Раскрыт его механизм, изучены закономерности и разработаны методы защиты деталей от этого, весьма интенсивного, вида разрушения поверхностей при трении.

Водородное изнашивание возникает в результате кооперативного (синергетического) взаимодействия поверхностных явлений: экзоэмиссии, адсорбции и трибодеструкции, которые приводят к выделению водорода. Совместно

с неравновесными процессами, идущими при деформации поверхностного слоя металла, создаются тепловые градиенты, электрические и магнитные поля и поля напряжений. Это приводит к диффузии водорода в металл, концентрации его в подповерхностном слое и ускоренному износу или разрушению этого слоя. Область водородного износа обширна.

Практически все трущиеся поверхности стальных и чугуновых деталей содержат повышенное количество водорода и, следовательно, имеют повышенный износ. Наличие влаги увеличивает интенсивность водородного изнашивания, не говоря уже о разложении в зоне контакта смазки, топлива или пластмассы.

Открытие водородного изнашивания металлов связало в один комплекс влияние на износ деталей водорода, тепловых, электрических, магнитных и вибрационных явлений. Водород в атомарном, ионном и даже в молекулярном состоянии при трении при указанных процессах, сопровождающих трение, оказывает разрушительное действие на металл. Поэтому расчет деталей на износ, исходя из действия какого-то одного отмеченного фактора, например тепловой динамики без учета водородного изнашивания не может привести к приемлемому результату для практики.

Как стало очевидно, наиболее эффективными методами подавления водородного изнашивания металлов являются методы, основанные на реализации эффекта безызносности.

Эффективность разработанных методов повышения износостойкости деталей и их применение в промышленности. Во введении настоящей книги были сформулированы и обоснованы современные проблемы триботехники и обозначена их общественная значимость. Отмечено, что триботехника должна решать узловые проблемы экономики, относящиеся к сырьевым, энергетическим и трудовым ресурсам страны и ее экологической безопасности.

На основе рассмотренных открытий разработаны новые конструкции узлов трения, износостойкие антифрикционные материалы, новые смазочные материалы и присадки к ним, приработочные покрытия, технологии безразборного восстановления машин и др. Во многих отраслях промышленности разработанные методы опробованы и применяются в течение многих лет (самолеты, автомобили, редукторы в метро и лифтах, холодильники, горнорудное оборудование, химическое оборудование, уплотнения насосов, дизели тепловозов, сельскохозяйственная техника) с большим экономическим эффектом.

Использование разработанных методов повышения износостойкости узлов трения позволяет:

- повысить ресурс машин и оборудования в 1,5-2 раза;

- сократить расход смазочных материалов в 2-3 раза и топлива на 3-12 %;
- повысить надежность работы узлов трения и, тем самым, уменьшить аварийность машин;
- ускорить время приработки машин в 2—3 раза и сократить потребление топлива и смазочных материалов;
- снизить потребление запасных частей в 2 и более раз;
- в ряде случаев заменить капитальный ремонт машины на ремонт без разборки;
- снизить загазованность атмосферы при работе автомобилей и тракторов в 1,5— 3 раза;

В настоящее время, когда начался подъем в развитии промышленности, транспорта и машиностроения, использование указанных методов крайне необходимо. Только повсеместное применение металлоплакирующих присадок к смазочным материалам в сочетании с ФАБО стальных и чугунных деталей позволит в короткие сроки без больших материальных затрат в значительной степени решить пять проблем трибологии, изложенные во введении книги.

Учебники по трибологии. Завершающим этапом развития работ по изучению эффекта безызносности и водородного изнашивания металлов явилось издание учебников по трибологии для втузов с широким освещением, как теоретических вопросов, так и практических применений научных открытий в промышленности. В изданных учебниках, в отличие от других учебников и учебных пособий, изложены и такие разделы трибологии, как конструктивные, технологические и эксплуатационные факторы, обеспечивающие надежность и долговечность машин и оборудования. Всего с 1985-2013 г.г. издано девять учебников и учебных пособий по трибологии на основе самоорганизации общим тиражом 32000 экземпляров.

Сведения об авторах

ГАРКУНОВ ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ

Родился в 1919 г. Доктор технических наук. Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники и премии Президента РФ в области образования. Основатель научной школы трибологии России. Окончил в 1941 г. Физико-математический факультет Томского государственного университета по специальности «Физика твердого тела». С 1941 по 1970 г. – служба в Советской армии. В 1945 г. окончил инженерный факультет Военно-воздушной академии им. Н.Е. Жуковского. Воинское звание – инженер-полковник. Участник Великой Отечественной войны. Докторскую диссертацию на тему «Методы повышения износостойкости деталей самолетов» защитил в 1962 г. С 1970 по 2004 г. заведовал кафедрами и был профессором кафедр в ряде институтов. С 1992 г. – президент отделения

«Проблемы безызносности машин и механизмов» Академии проблем качества. Опубликовал около 200 работ по триботехнике, из них 28 монографии. Председатель консультационного совета по триботехнике МГТУ им. Н.Э. Баумана. Соавтор 2-х научных открытий. Лауреат премий Правительства и Президента РФ в области науки и техники и образования. Удостоен Золотой медали международного совета по трибологии.

МЕЛЬНИКОВ ЭДУАРД ЛЕОНИДОВИЧ

Родился в 1941 г. Доктор технических наук. Профессор кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н.Э.Баумана, заслуженный изобретатель России. Окончил в 1963 г. Запорожский машиностроительный институт. Работал на опытном заводе и в КБ академика В.П. Макеева. Организовал на оборонном заводе сектор науки, объединяющий несколько научно-исследовательских лабораторий. В 2000 г. защитил докторскую диссертацию по вопросам влияния внешнего трения на точность оболочковых деталей летательных аппаратов. Специалист в области обработки металлов давлением, им разработаны теоретические основы гидродинамического трения в листовой штамповке. В последние годы работает в области триботехнологий в реновационном производстве (руководит направлением), с 2003 г. читает курс лекций «Триботехника в реновации» в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор шести монографий, 50 научных статей, 81 авторского свидетельства и патентов на изобретение, часть из которых опубликованы в США.

БАБЕЛЬ ВАЛЕНТИНА ГРИГОРЬЕВНА

Родилась в 1929 г. Окончила Московский химико-технологический институт им. Д.И. Менделеева в 1953 г. Работала в Ленинградском НИИ по переработке нефти и газа и в Ленинградском технологическом институте им. Ленсовета с 1961 по 1994 г., доктор технических наук (1987 г.), академик Академии проблем качества, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники; лауреат премии Президента РФ по образованию. Опубликовала свыше 80 научных работ, имеет 22 авторских свидетельства и патента на изобретения. Крупный специалист в области металлоплакирующих смазочных материалов для узлов трения механизмов и машин. Разработала теоретические основы создания противоизносных присадок нового поколения – маслорастворимых металлоплакирующих добавок с использованием металлов переменной валентности, смазочные композиции («Валена» и «Сервовит») придающих высокие антифрикционные и антиокислительные свойства смазывающим материалам.