

## ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ УЗЛОВ ТРЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПОЗИЦИОННЫХ СМАЗОК С ГЕТЕРОГЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

Рассматриваются общая схема расчета надежности трибосопряжений по износным параметрам, физико-химические процессы в пограничных слоях трибосопряжений. В результате исследований предложенные композиционные смазки с гетерогенной структурой улучшающие триботехнические показатели пар трения.

**Ключевые слова** триботехнические системы, повреждения, приработка, химико-физические поверхностные явления, композиционные, гетерогенная структура.

Специфической особенностью работы материалов в узлах трения является повышение кинетической энергии атомов на трущихся поверхностях, разрыв межатомных связей в результате процессов упругой и пластической деформации. Рост энергетического потенциала атомов, проявляющийся в повышении температуры поверхности трения, приводит к изменению физико-механических и других характеристик, которые были свойственны материалу в исходном состоянии, и, кроме того, активирует ряд необратимых процессов, особенно в условиях трения без смазки.

При трении различные компоненты, составляющие пару трения, взаимодействуют между собой, а материал — с внешней средой. При этом в результате физических, химических, электрохимических и механических процессов образуются продукты износа, химический состав и структура которых отличны от состава и структуры исходных веществ пары трения.

Можно выделить следующие основные классы повреждений трибосопряжений машин:

- в процессе эксплуатации;
- усталостные;
- повреждения из-за превышения допустимой деформации на поверхнос
- тях трения;
- повреждения в результате коррозионно-механического изнашивания и вследствие молекулярно-термического схватывания в зонах сухого трения;
- повреждения, связанные с ошибками на стадиях проектирования, изготовления и сборки.

С математической точки зрения повреждения, а также надежность работы агрегатов машин можно описать с помощью вероятностных функций, т.е. экспоненциальных функций Вейбулла, а применительно к трибосопряжениям представить в таблице 1.

Структурно-логическую схему расчета триботехнических повреждений по износу, можно представить в виде блок-схемы (рис.1)

Приработка является неизменным периодом работы трущихся сопряжений машин. По мнению ряда авторов, приработка в значительной степени определяет безотказность узла трения в эксплуатации, его долговечность. Однако, в большинстве исследований приработка рассматривается как неуправляемый процесс, изучение которого проводится при постоянных внешних условиях, без учета кинетических способностей приработки, зависимости от температуры, условий и режимов трения.

Изменение приращения температуры оказывает первостепенное влияние на вязкость и пьезокоэффициент смазки, которые определяют «динамическую» толщину смазочной пленки. Процессы трансформации поверхностного слоя прирабатывающихся поверхностей являются реакцией на ужесточение трения в результате изменяющихся внешних параметров. Направление процессов в контакте (приспособляемость-заедание) обусловлено физической и химической природой защитных пленок, условиями смазки, которые определяются диапазоном изменения текущих значений параметров внешнего воздействия.

Таблица 1

Трибологические повреждения

Условия, приводящие к повреждению	Диссипативные процессы	Виды повреждений
Избыточная нагрузка; ударные нагрузки; вибрация; высокие температуры; неправильный выбор материалов; неправильная сборка; плохая подгонка; рассогласование; неподходящая смазка; неправильная подача смазок к трущимся поверхностям; несоответствующая толщина смазочной пленки; наличие воды в смазке; загрязнение смазки; наличие примесей.	Циклические напряжения; пластическое течение; нагрев, циклический нагрев; усталость (распространение трещины); адгезия; резание; диффузия материала; коррозия.	Неадекватное трение; неустойчивость; деформация; разрушение; повреждение поверхности; износ; схватывание.

\* – автор, с которым следует вести переписку.



Рис. 1. Общая схема расчёта надёжности трибосопряжений по износу

Для обеспечения эффективной приработки параметры внешнего воздействия должны назначаться таким образом, чтобы:

а) не наблюдалось необратимых процессов, сопровождающихся повышением коэффициента трения, т.е. внешними воздействиями должны быть созданы такие условия прохождения приработки, когда сопряжения не получают повреждений поверхностей и интенсивно реализуются процессы приспособляемости;

б) не имели место режимы жидкостной смазки, когда поверхности трения полностью разделены слоем смазки и приработочные процессы неосуществимы.

Влияние воздействия обеспечивают эффективную приработку в том случае, если работа сопряжения будет проходить в режиме устойчивого смешанного режима трения.

Например, сопряжения полностью приработанного дизельного двигателя при номинальной нагрузке работают при максимальном уровне реализуемой в данных условиях трения нагрузочной способности. При этом внешнюю характеристику дизеля, являющуюся совокупностью предельно возможных режимов работы, можно рассматривать как границу появления заедания в сопряжениях (или наиболее нагруженных из них). Для практики большое значение имеет задача оптимизации режимов приработки движущихся деталей после изготовления и ремонта машин.

Известно, что процесс трения — не только результат сцепления поверхностных неровностей контактирующих тел и следствие молекулярного взаимодействия, как это трактовали ранее. Процесс трения является динамическим. Свойства материала, его состав и структура в поверхностных слоях подвержены непрерывным изменениям, вслед-

ствие чего на рабочих поверхностях контакта могут образоваться так называемые вторичные структуры, которые влияют на износостойкость пары трения. Сопrotивление материала поверхностного слоя, его силы адгезии и механизм износа непрерывно изменяются под влиянием внешних факторов. Поэтому поведение рабочего поверхностного слоя можно охарактеризовать как некий переход из одного физического состояния в другое, соответствующее определенным условиям динамического контакта. Основная суть такого перехода определяется физико-химией поверхностных явлений и закономерностями деформации материалов.

Таким образом, состояние рабочего слоя материала, а, следовательно, его работоспособность определяются процессами, протекающими при трении:

- окислением, которое является результатом взаимодействия рабочих поверхностей с окружающей средой;
- диффузионным перераспределением элементов в поверхностном слое; избирательным переносом элементов при трении;
- фазовыми и структурными превращениями; абсорбционным снижением прочности поверхностного слоя;
- распределением напряжений в рабочем слое и его износостойкостью, аморфизацией структуры поверхностного слоя.

Окислительные процессы, протекающие вследствие взаимодействия поверхности трения с кислородом воздуха, способствуют образованию оксидных пленок, истирание которых приводит к окислительно-механическому износу. Отсутствие или недостаток кислорода на поверхности трения затрудняет или полностью исключает образование оксидных пленок, что приводит к развитию процессов схватывания или аварийного износа.

Роль кислорода остается значительной не только при трении в воздушной среде, но и при трении со смазкой. Так при отсутствии кислорода в газовой среде трения резко снижается смазочное действие углеводных материалов, так как смазка не содержит продуктов их окисления.

В сложных трибосистемах, таких как композиционные порошковые материалы, содержащие различного рода антифрикционные добавки, например серу или сульфиды, процессы окисления существенно усложняются. Методами электронной микроскопии установлено, что при введении порошка серы в зону трения в начальный период на стальных поверхностях трения образуется сульфид железа, ферросульфат, а при установившемся трении появляется пленка моногидроксида  $FeO(OH)$  с гексагональной кристаллической решеткой, имеющая низкий коэффициент трения. Однако, окисление поверхностей трения оказывает на трибологические свойства положительное влияние только до определенного уровня. Необходимо учитывать комплекс свойств оксидной пленки: прочность, хрупкость, прочность связи с поверхностью основного металла. Поэтому оксиды не всех металлов улучшают антифрикционные качества пары трения [1].

Поверхностные пленки в материале на основе фосфористого железа, содержащего медь и некоторые другие элементы, после работы в паре с чугуном СЧ 21-40 различаются составом. Белые пленки содержат большее количество чистых металлов, а темные — больше локализованных оксидов этих металлов или их смесей. При этом из порошкового материала медь переносится на поверхность чугуна и диффундирует на глубину до 20 мкм. По мере износа происходит массоперенос составляющих контртела, в частности хрома, на поверхность спеченного материала.

В состояниях самоорганизации трибосистемы проявляют адаптивное поведение, выражающееся в наименьших потерях энергии и (или) максимально возможной износостойкости.

Структура трибосистемы как открытой динамической системы, в частности, характеризуется структурой входящих материалов (зеренной, симметрии решетки, распределения компонентов, электронных конфигураций и т.п.), т.е. структурой частиц и структурой распределений возбужденных состояний — квазичастиц (дислокаций, фононов, электромагнитных волн и т.п.).

Понятия саморегулирования (поддержания динамического равновесия процессов) и адаптивного саморегулирования (с изменяющейся структурой регулятора) могут быть конструктивно использованы только при наличии модели, включающей: объект регулирования, регулятор, целевую функцию и параметр обратной связи. Наблюдая за эволюцией системы, можно отметить такие основные признаки синергичности (табл.2).

Для того, чтобы в зазоре между движимыми относительно друг друга поверхностями смазочный слой под нагрузкой мог сохранить неразрывность, зазор должен самопроизвольно стать клиновидным.

При этом распределение скоростей истечения масла по толщине зазора и давления вдоль зазора становятся нелинейными. Постоянная толщина зазора возможна при соответствующем распределении температуры вдоль него (тепловой клин).

Саморегулирование реализуется также путем

снижения вязкости и потерь на трение и возрастания вязкости от давления.

С современных позиций, создание высокоэффективных триботехнических материалов для экстремальных условий эксплуатации (высокие прижимные усилия и скорости скольжения, отсутствие смазки, глубокий вакуум) включает в себя ряд основных этапов.

Основу материала выбирают, исходя из соответствия комплекса её физико-механических и триботехнических свойств заданным нагрузочно-скоростным и температурным режимам работы. Наиболее часто основой триботехнических материалов служат железо, медь, титан.

Для снижения потерь на трение в основу вводят твердосмазочный компонент, который образует на трущихся поверхностях экранирующие плёнки, не взаимодействуя с основой. Обычно роль твёрдой смазки играют мягкие пластичные металлы — серебро, молибден, свинец, олово, их сплавы.

Снижение склонности к схватыванию и повышение несущей способности композиции достигается путем легирования основы компонентами, которые либо входят в твёрдый раствор с матричным материалом, либо образуют новую, более прочную фазу. Например, для меди такими добавками могут быть олово, никель, марганец, фосфор. Для жёстких условий работы в состав матричного материала вводят твёрдые тугоплавкие соединения, которые воспринимают при трении значительную часть нагрузки. Наконец, для повышения прочности связи между основой и тугоплавкими включениями в состав композиции вводятся адгезионно-активные компоненты, улучшающие смачиваемость (титан, литий и другие).

Для повышения износостойкости композиции в неё вводили фосфористую медь. В процессе синтеза композиционного материала образуется эвтектика, состоящая из  $\alpha$ -твердого раствора медь—олово и фосфида меди  $Cu_3P$ . Расплавленная эвтектика смачивает раствор легирующих элементов в меди и располагается по границам зерен в виде «разорванной сетки» (рис.2).

Таблица 2

Признаки синергичности систем

№	Вид представления или наблюдения эволюции системы	Признак синергичности
1.	Имеется уравнение движения или кинетики определяющего параметра	Возникновение неустойчивости типа бифуркации и автоколебательного или автоволнового решения.
2.	Введен параметр порядка, непрерывно изменяющийся по потоковой координате.	Возникновение макрофлуктуаций параметра порядка и кинетические фазовые переходы.
3.	Имеется физико-статическое (микрокинетическое) описание.	Необходимость учета новых иерархических уровней системы, обусловленных включением в нее воздействий или релаксационным осреднением до мезоуровня.
4.	Наблюдается молекулярная, атомная, дислокационная структура частиц.	Возникновение крупномасштабного динамического упорядочения: гидродинамические ячейки, концентрационные волны и т.п.
5.	Имеется модель автокаталитического цикла (гиперцикла).	Возможность информационно-кодowego описания.
6.	Изменяется энтропия возбужденной подсистемы частиц.	Происходит скачкообразное уменьшение энтропии или минимизации ее производства.



Эта фаза при трении препятствует интенсивной пластической деформации поверхностного слоя, снижая при этом температуру в зоне трения и устраняя схватывание. При таком расположении эвтектики материал упрочнён, однако не теряет пластичности и обладает возможностью равномерно распределять энергетическую нагрузку, возникающую к узле трения при больших скоростях вращения. Сохранение пластичности позволяет материалу адаптироваться к этим условиям работы без разрушения.

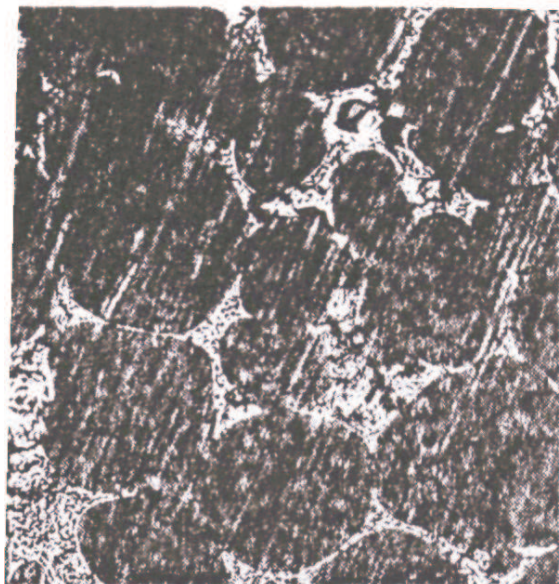


Рис.2. Распределение эвтектики в виде «разорванной сетки» по границам зерен в структуре композиционного материала на основе меди (x400)

Основа композиционного материала, имеющая микрогетерогенную структуру, приобретает необходимые триботехнические характеристики при введении в нее дисульфида молибдена и серы. В процессе синтеза материала сера взаимодействует с медью, образуя сульфиды. Слоистые соединения — дисульфид молибдена и сульфиды меди — выполняют функции твёрдых смазок и образуют при трении смазочную плёнку на рабочей поверхности, препятствующую схватыванию).

Соблюдение описанных морфологических принципов композиционного материала и оптимизация технологического обеспечения позволяет достичь следующих эксплуатационных характеристик триботехнической пары (контртело — сталь 45):

- коэффициент трения 0,5—0,10;
- интенсивность изнашивания 0,003—0,008 мкм/км при давлении 0,1 МПа;
- скорость скольжения 1,2-2,0 м/с.

Необходимо отметить, что при скорости скольжения 1,2—2,0 м/с долговечность подшипников достигла 480—1520 ч. Образцы материала ИПМ-304 при пятикратном повышении скорости скольжения (от 0,2 до 1,0 м/с) показали значительное снижение как коэффициента трения, так и износа, а при пятикратном увеличении нагрузки (с 2 до 10 Н) — практически неизменные минимальные значения коэффициента трения, и износа

При испытаниях образцов материала ИПМ-304 на воздухе триботехнические характеристики резко ухудшаются (рис. 3).

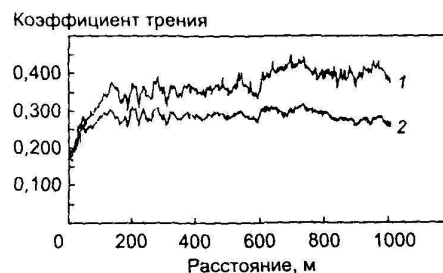


Рис. 3. Изменение коэффициента трения образцов материала ИПМ-304. в зависимости от пути пробега на воздухе: 1 — температура 80 °С; 2 — температура 20 °С.

Повышение коэффициента трения и его колебания, а также увеличение износа образцов являются следствием ухудшения самосмазывания. В результате окисления свинца продукты износа содержат значительное количество его оксида, который уступает чистому металлу как по смазочному действию, так и по адгезионным свойствам.

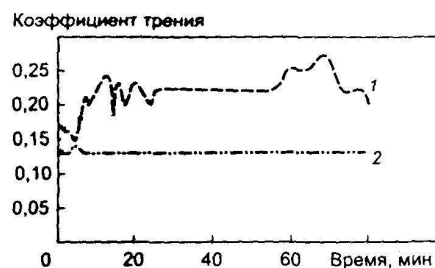


Рис.4. Влияние температуры окружающей среды на изменение среднего значения коэффициента трения материала ИПМ-305 в паре с контртелом из стали ШХ15: 1 — температура 80°С; 2 — температура 20 °С.

Из рис. 4 следует, что средние значения коэффициента трения составляют 0,13 (при нормальной температуре). Разброс значений в период установившегося трения невелик — от 0,13 до 0,15.

Фрикционное взаимодействие указанной пары трения на воздухе характеризуется нестабильным и более высоким коэффициентом трения; среднее значение колеблется от 0,13 до 0,28.

Экспериментальные исследования процесса трения показали, что композиционный материал, имеющий микрогетерогенную структуру, способствует выравниванию (стабилизации) коэффициента трения и препятствует процессу схватывания при температурах в зоне трения до +60°С (рис. 4).

Литература

1. Крагельский, И. В. Узлы трения машины : справ. / И. В. Крагельский, Н. М. Михин. — М. : Машиностроение, 1983. — 320 с.
2. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / под общей ред. А. В. Чичинадзе. — М. : Машиностроение, 2001. — 240 с.
3. Пономарева, О. М. Обеспечение устойчивости систем приводов колесных машин : моногр. / О. М. Пономарева, Г. К. Аннакулова, Ю. Ю. Моисеенко . — Фан, 2006. — 257с.