

Таким образом, доказано, что при возникновении во вращающемся кольце с опорами установившихся периодических колебаний прецессия стоячей волны может происходить с угловой скоростью, равной угловой скорости вращения кольца.

Аналогичные результаты автор получил и для вращающейся на двух опорах оболочки с нерастяжимой и растяжимой средней линией.

Также было получено доказательство, что кроме рассмотренного выше установившегося прецессионного движения возбужденной стоячей волны во вращающемся кольце с опорами может существовать периодическое прецессионное движение с частотой, равной первой собственной частоте колебаний кольца, обусловленной наличием опор.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журавлев В. Ф., Климов Д. М. Волновой твердотельный гироскоп. – М.: Наука, 1985. -125 с.
2. Журавлев В. Ф., Климов Д. М. Прикладные методы в теории колебаний.– М.: Наука, 1988.-326 с.
3. Басараб М. А., Кравченко В.Ф., Матвеев В.А. Математическое моделирование физических процессов в гироскопии.– М.: Радиотехника, 2005. -312с.
4. Полунин А. И. Математическое моделирование динамики упругого вращающегося кольца при наличии двух опор.// Известия РАН. МГТ. 1999.– №6.–С. 153 – 158.

**620,9:662.92**

## ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ МАШИН И МАШИННЫХ АГРЕГАТОВ

*Канд.техн.наук, доц. П. М. БЫКОВ, д-р.техн.наук, проф. Г. И.ШАРОВ*

*Проанализированы существующие методы защиты деталей от износа, направленные на энергосбережение машин и машинных агрегатов. Проведён анализ традиционных методов. Предложен наиболее оптимальный вариант повышения энергосбережения, позволяющий при введении в зону контакта серпентинно-магниевого со-*

*става (СМС) получить на поверхности контактирующих деталей защитный слой с более высокими механическими свойствами. Дана сравнительная оценка предлагаемого метода защиты узлов трения от износа по отношению к традиционным, получившим широкое применение на этапах изготовления и эксплуатации машин.*

Задачи энергосбережения, определенные в Законе РФ «Об энергосбережении», предполагают реализацию правовых, организационных, научных, производственных, технических и экономических мер, направленных на эффективное использование энергетических ресурсов и вовлечение в хозяйственный оборот возобновляемых источников энергии. Поэтому одной из важнейших задач, стоящих перед машиностроительной отраслью Российской Федерации, является улучшение эксплуатационных свойств машин и агрегатов за счет повышения их долговечности и экономичности. Значимость этой задачи постоянно возрастает из-за значительных эксплуатационных затрат, связанных с обслуживанием агрегатов и механизмов.

Энергосбережение машин и агрегатов во многом зависит от трения и, как следствие, изнашивания в подшипниковых узлах, которое приводит к нарушению геометрии деталей трения, изменению точности их взаимного расположения и перемещения. При этом возникают такие явления как заклинивание, удары, вибрации, приводящие к поломкам деталей и механизмов. Изнашивание деталей и механизмов увеличивает потери энергии, перегрев механизмов, снижает производительность, повышает степень опасности для обслуживающего персонала и окружающей среды. Трение и изнашивание взаимообусловлены: трение приводит к изнашиванию, а изнашивание - к увеличению трения. С изнашиванием деталей увеличиваются затраты энергетических ресурсов на эксплуатацию машин и расходы на их текущий и капитальный ремонты.

Таким образом, можно сформулировать основные задачи энергосбережения машин и машинных агрегатов: получение максимальной полезной работы при минимальных затратах энергетических ресурсов и увеличение долговечности за счет снижения трения и повышения износостойкости трибохимических соединений. В качестве основных мероприятий по повышению эксплуатационных свойств машин и агрегатов [1] можно выделить следующие основные направления: совершенствование конструкции машин и механизмов и оптимальный подбор материалов пар трения; использование антифрикционных материалов с противоизносными свойствами; применение техно-



логий, улучшающих качество поверхностей трения; разработка присадок к смазочным материалам; создание восстанавливающих антифрикционных препаратов.

Проблеме совершенствования конструкции и выбору материала всегда уделяют повышенное внимание, так как решение этих вопросов позволяет обеспечить требуемую прочность и долговечность деталей. Фактически существует только несколько правил, позволяющих улучшить конструкцию узлов трения - это правило несовпадения твердости вала и подшипника скольжения, правило максимального различия размеров трущихся поверхностей и правило снижения концентрации контактных напряжений.

Правило несовпадения твердости вала и подшипника скольжения заключается в том, что материал вала должен быть тверже материала подшипника. В такой паре поверхность вала практически не изнашивается, поскольку является высокопрочной и твердой, а поверхность вкладыша пластична и не боится деформаций.

Правило максимального различия размеров структурных составляющих материала основано на том, что в прямой паре вал - втулка структурные элементы, например, вала из стали, имеют размеры в долях микрометра –  $10^{-6}$  мм, а втулки из бронзы –  $10^{-4}$  мм. При подобном подборе, разнородность свойств и размеров структуры трущихся поверхностей предотвращает и снижает действие схватывания и задира.

Правило снижения концентрации контактных напряжений предусматривает уменьшение влияния деформаций узлов трения за счет повышения точности и жесткости деталей и применения задаваемой податливости.

Одним из методов борьбы с износом является метод избирательного переноса при трении или «эффект безызносности», открытый Д. Н. Гаркуновым, И. В. Крагельским [2]. Явление избирательного переноса определяют как вид фрикционного взаимодействия, характеризуемый, в основном, молекулярной составляющей сил трения. Для этого явления наиболее характерно образование защитной пленки, в которой реализуется особый механизм деформации, протекающий без накопления дефектов, свойственных усталостным процессам. Эта пленка повышает износостойкость поверхностей на два порядка и снижает силы трения на один порядок по сравнению с аналогичными условиями трения при граничной смазке. К недостаткам метода избирательного переноса следует отнести невозможность его использования в условия эксплуатации.

Конструктивные методы повышения износостойкости широко применяются на стадии проектирования механизма, и именно они определяют его долговечность. К недостаткам конструктивных методов следует отнести экономические аспекты и ограничения по массогабаритным показателям изделий.

Выбор антифрикционных материалов узлов трения представляет собой базовую проблему при стремлении к высоким эксплуатационным характеристикам. При выборе материалов узлов трения должна учитываться их совместимость и, в особенности, исключение схватывания и последующего задира. В настоящее время применяют прямые и косвенные методы оценки совместимости материалов узлов трения [3]. В обоих случаях сначала проверяется совместимость кристаллических решеток. При прямых методах проводятся испытания материала на машинах трения с целью определения границ применимости исследуемой пары. Косвенные методы основаны на определении параметров микрогеометрии, микроструктуры поверхностных слоев, физико-механических свойств, их изменения в процессе трения. Антифрикционные сплавы на медной, цинковой, алюминиевой и оловянно-свинцовой основах, антифрикционные чугуны с графитными включениями применяются в механизмах. Одним из направлений получения антифрикционных материалов – создание порошковых антифрикционных композитов на основе меди, железа и бронзы [4]. Активно используются металлокерамические материалы. Расширяется также область применения пористых спеченных подшипников [5]. Однако, несмотря на очевидную выгоду использования антифрикционных материалов, возможность их применения ограничивается этапом проектирования машин. Отдельным вопросом при выборе материалов являются экономические соображения. Поэтому материалы для узлов трения необходимо создавать из доступных недефицитных компонентов с использованием недорогих технологий.

Технологические методы повышения износостойкости поверхностей трения и улучшения их антифрикционных свойств применяются в машиностроении и в металлургии. При этом следует отметить, что часть их используется при изготовлении машин, а часть при ремонтно-восстановительных работах. Их подразделяют на: химико-термическая, объёмная и поверхностная закалка, электрохимическая, механотермическая, химическая обработка, наплавка износостойких слоев, напыление порошковых покрытий, ионно-плазменная обработка, плакирование, механическое упрочнение [6].

Целью химико-термической обработки (ХТО) является создание на стальной поверхности тонкого легированного слоя за счет диффузии извне легирующих элементов. К ХТО относятся цементирование, азотирование, борирование, насыщение хромом, никелем, цианирование, борохромирование, карбоборирование. Поверхностная закалка сопровождает ХТО, но может использоваться и самостоятельно. В самостоятельном виде она применяется для образования твердого износостойкого слоя на поверхности



деталей из средне - и высокоуглеродных сталей и некоторых чугунов. Ей предшествует объемная термообработка: нормализация или объемная закалка и высокий отпуск. Она состоит из двух операций: нагрева поверхностного слоя и быстрого его охлаждения. По способу нагрева различают следующие методы поверхностной закалки: высокочастотный, контактный, плазменный (при нагреве в электролите), лазерный [7].

Электрохимические покрытия широко используются в современной технологии. Их наносят на поверхности методом электролиза. Чаще всего применяются электролитическое хромирование, серебрение, нанесение покрытия из олова, свинца, цинка, индия и сплавов легкоплавких металлов [8].

Метод химической обработки предназначен для создания защитных слоев за счет химических реакций: никель-фосфорные покрытия, получаемые за счет выделения металлов из раствора их солей; сульфидирование, получаемые за счёт обогащения поверхностных слоев стальных деталей серой [9].

Создание защитных пленок на поверхностях ответственных деталей происходит за счет химического воздействия газовой среды при определенных значениях температуры и давления. Пример такого метода – создание на поверхности прочно связанного с основой слоя дисульфида молибдена [10].

Метод механотермического формирования износостойких покрытий заключается в том, что защитный слой кристаллизуется из расплава при действии нагрузки [11].

Один из распространенных способов восстановления изношенных деталей механизмов – наплавка износостойких слоев. Имеется большое число методов наплавки, которые различаются источниками тепловой энергии, способами защиты наплавляемого металла, уровнем автоматизации [11].

Для создания износостойких слоев применяется напыления покрытий из порошковых материалов. Напыление также широко используется для восстановления формы изношенных деталей [10].

В методе ионно-плазменной обработки наносимый в условиях вакуума металл превращается в плазму, а затем в атмосфере реакционного или инертного газа оседает на поверхности детали [10].

Метод плакирования - это метод создания толстослойных покрытий и применяется при изготовлении деталей или при восстановлении их формы после изнашивания [9].

В методе механического упрочнения поверхностей используется явление значительного роста предела текучести, а следовательно, и твердости материала, при высокой

степени пластической деформации - деформационное упрочнение. Метод реализуется путем обкатывания поверхностей роликами или шариками, выглаживания сферическими алмазными наконечниками, обработки струей из мелких стальных или стеклянных шариков (дробеструивание) [12].

Технологические методы повышения износостойкости машин и агрегатов имеют следующие недостатки: требуют вывода машин из эксплуатации, а также использования специального дорогостоящего оборудования и выполнения специальных трудоемких технологических процедур. Эти методы затратные и требуют высокой квалификации от исполнителей.

При эксплуатации машин и машинных агрегатов происходят химические и физические изменения состава и свойств смазочных масел, что приводит к повышенному износу узлов трения и к дополнительным энергопотерям. Для предотвращения подобных изменений в смазочные масла вводят специальные органические вещества и их композиции (присадки и твердые нерастворимые вещества). По химическому составу присадки представляют собой производные различных органических соединений: алкилфенолов, аминов, дитиофосфорных, дитиокарбаминовых, салициловых кислот и ряда других веществ. Молекулы присадок состоят из одной или нескольких полярных и одной или нескольких неполярных групп. Полярные группы обуславливают адсорбцию молекул поверхностно-активных присадок на границе между маслом и металлом. Неполярные группы (алкильные радикалы, нафтеновые, ароматические кольца и их сочетания) определяют растворимость присадок в маслах. Присадки к маслам [9] подразделяют: на вязкостные; антифрикционные; противоизносные; противозадирные; депрессорные; прирабочные; антиокислительные; антикоррозионные; моющие; дисперсанты; противопенные. Присадки к маслам влияют на работу трущихся поверхностей, однако износ поверхностей трения вносит индивидуальные отличия в работу узлов трения и присадки к маслам не решают проблемы энергосбережения в условиях эксплуатации.

Эффективным способом повышения износостойкости и снижения коэффициента трения в машинах является применение восстанавливающих антифрикционных препаратов (ВАФП) [13], основной эффект от применения которых заключается в восстановлении геометрии трущихся поверхностей и регулирования зазоров в сопряжениях. При этом также наблюдается изменение свойств поверхностей: шероховатости, коэффициента трения, твердости. В результате происходит снижение механических потерь, повышение межремонтного срока службы, уменьшение потребления электроэнергии машинами.



ВАФП разделяют по структуре и свойствам активных компонентов:

1. Реметаллизанты - составы, содержащие мелкодисперсные порошки, соединения или ионы мягких металлов (медь, бронза, кадмий, олово и др.). Эти соединения заполняют шероховатости микронеровностей и создают плакирующий слой, восстанавливающий поверхности трения. Они имеют существенный недостаток, заключающийся в том, что поверхностная твердость и износостойкость плакирующего слоя ниже, чем у основного материала детали [9].

2. Тефлоносодержащие антифрикционные препараты используются в зонах узлов трения со сравнительно низкими температурами. Механизм сцепления тефлонового покрытия с поверхностью детали характеризуется нестойкостью. Для эффективной работы данного типа ВАФП необходимо его постоянное присутствие в масле [11].

3. Полимерные антифрикционные препараты снижают энергию и повышают давление масла в системах смазки. Данный эффект наблюдается до тех пор пока на поверхности трения сохраняется полимерный защитный слой. Основным недостатком использования этого препарата в том, что приемник масляного насоса и масляные каналы зарастают полимерами [9].

4. Слоистые модификаторы трения - это препараты, содержащие сернистые соединения молибдена, вольфрама и тантала. Механизм их работы состоит в формировании на поверхностях трения слоя с низким коэффициентом трения. Применение слоистых модификаторов приводит к коррозионному разрушению поверхности [9].

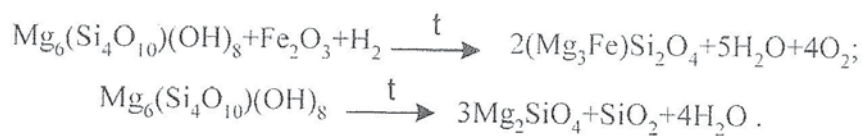
5. Кондиционеры металлов - препараты, построенные на базе хлорпарафиновых соединений, которые растворяют металлические продукты износа, образуя соли. На поверхности трения возникает защитная пленка, обладающая пластическими, упругими и антифрикционными свойствами. Однако кондиционеры металлов имеют высокую токсичность [9].

6. Мелкодисперсные композиции на базе искусственных алмазов модифицируют трение скольжения в трение качения. Роль шарикоподшипников выполняют ультрадисперсные алмазы. При этом наблюдается снижение мощности трения в 3 - 5 раз. Наличие твердых включений может привести к внедрению частиц в поверхностный слой детали и к образованию своеобразной «терки» [11];

7. Эпиламные и металлоорганические антифрикционные препараты формируют защитные слои поверхностей трения по механизму химосорбции. Эпиламообразующие вещества - это поверхностно-активные соединения с содержанием фтора, молекулы которого играют роль своеобразного армирующего материала, повышающего поверхностную прочность деталей. Металлоорганические антифрикционные препараты в зоне трущихся поверхностей под воздействием поверхностно-активных веществ образуют соединения металлов, реализующие микрошлифовку поверхностей. Износостойкий антифрикционный слой в обоих случаях формируется на атомарном уровне, что определяет его высокую прочность. К недостаткам данных препаратов следует отнести высокую стоимость и возможность их использования только в зонах высоких температур [10].

8. Ремонтно-восстановительные составы получили широкое распространение [14,15]. Преимуществами препаратов данной группы является универсальность, относительно невысокая стоимость, положительный опыт их применения в разных отраслях промышленности. К недостаткам следует ухудшение технико-экономических показателей машин и даже выход их из строя [14]. Однако, именно использование серпентинито-магниевого состава (СМС) представляется нам наиболее оптимальным для машин и машинных агрегатов с целью решения проблемы энергосбережения.

Эффект СМС основан на создании металлосиликатного слоя на поверхностях трения, в процессе химической реакции [15]



В процессе трения кристаллы  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  уплотняются и ориентируются в направлении относительного перемещения поверхностей, происходит рост их размеров, увеличивается твердость и контакт трущихся поверхностей на металлосиликатной основе. Трение металлосиликатных поверхностей значительно уменьшается, локальные температуры трения снижаются, рост металлосиликатной поверхности прекращается. Полученная металлосиликатная поверхность имеет одинаковый с основным металлом коэффициент линейного термического расширения, обладает высокой твердостью и свойствами диэлектрика. В результате создаются условия, исключающие выход машин и агрегатов из строя по причине износа трущихся поверхностей, а ресурс машин будет определяться усталостными свойствами материалов деталей. При этом срок безре-



монтажной эксплуатации механизма становится практически равным сроку службы механизма.

Таким образом, благодаря использованию СМС можно получить следующие положительные эффекты: не требуется применение антифрикционных материалов с повышенными противоизносными свойствами; нет необходимости использовать технологии, улучшающие качество поверхностей трения машин; отпадает необходимость разработки присадок к смазочным материалам; принципиально меняются технологии ремонта машин и структура ремонта; уменьшается трение в машинах и повышается их производительность.

В итоге повышается эффективность использования энергетических ресурсов при эксплуатации машин и машинных агрегатов, что является одной из форм энергосбережения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беркович И. П., Громаковский Д.Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения. Учебник для ВУЗов. – Самара, СГТУ, 2000.
2. «Избирательный перенос в тяжелонагруженных узлах трения – Под ред. Д.Н. Гаркунова. –М.: Машиностроение, 1982. 207 с.
3. Буше Н.А., Копытко В. В. Совместимость трущихся поверхностей. – М.: Наука, 1981.–233 с.
4. Белый А.В., Карпенко Г.Д., Мышкин К.Н. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев. – М.: Машиностроение, 1991. 208 с.
5. Федорченко И.М., Пугина А.И. Композиционные спеченные антифрикционные материалы. Киев: Наукова думка, 1980, – 400 с.
- 6.Елизаветин М. А. , Сатель А.А. Технологические способы повышения долговечности машин. М.: Машиностроение, 1979. 438 с.
7. Н.Н.Рыкалин, Л. А. Углов, И. В. Зув и др. – Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. М.: Машиностроение, 1985.495 с.
8. Трение, изнашивание и смазка: Справочник: В 2 кн. под ред. И.В. Крагельского. М.: Машиностроение, 1978.
9. П.И.Санин, Е.С. Шепелева, А.О.Мяник и др. – Химическая модификация поверхностей трения. Сб. Новое о смазочных материалах. Изд-во «Химия», 1967,– 60 с.
- 10.Крагельский И.В., Михин Н.М. «Узлы трения машин». Москва, Машиностроение, 1984. 382 с.

11. Киршенбаум В.Я. Механотермическое формирование поверхностей трения. – М.: Машиностроение, 1987. –230 с.
12. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник.–М.: Машиностроение, 1987. –327 с.
13. Шаров Г.И., Быков П.М. Трение в машинах и механизмах и методы его снижения. Вологда, ГТУ. Материалы всероссийской научно-технической конференции «Вузовская наука – региону», 2006.
14. Шаров Г.И., Ерохин И.А., Осипенко Ю.В. Обоснование применения серпентино-магниевого состава (СМС) в узлах трения судовых ДВС.– СПбГМТУ, Материалы межотраслевой научно-технической конференции, посвященной 75-летию кафедры судовых ДВС и дизельных установок, – СПб., 2005.
15. Хайнике Г. Трибохимия:– Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 584 с.