

## ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЧЕРВЯЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТАЛЛОПЛАКИРУЮЩИХ СМАЗОК

Б.Р. КИСЕЛЕВ, К.Г. БЕРЕЗИН, С.А. ЕГОРОВ, Р.Р. АЛЕШИН

(Ивановский государственный химико-технологический университет,  
Ивановская государственная текстильная академия)

E-mail: [kiss@isuct.ru](mailto:kiss@isuct.ru), [esa@igta.ru](mailto:esa@igta.ru)

*Для механизмов, работающих при скоростях скольжения достигающих порядка 25...30 м/с, разработана антифрикционная, противозадирная и противоизносная смазочная композиция, содержащая стеараты металлов переходных групп.*

*For the mechanisms working at speeds of sliding up to 25 ... 30 km/s, an anti-frictional, extreme pressure, antiwear lubricant composition containing metals stearates of transitional groups is developed.*

**Ключевые слова:** трение, изнашивание, смазывание, металлоплакирование, червячная передача.

На многих текстильных машинах частота вращения рабочих органов отличается в сотни раз, при этом движение на машине осуществляется от одного двигателя. Это приводит к необходимости использования механизмов, обладающих большим передаточным отношением. В связи с этим червячные передачи нашли широкое применение в приводах текстильных машин, так как позволяют создавать большие передаточные отношения. Конструкция червячной передачи приводит к возникновению больших контактных напряжений между червяком и червячным колесом, которые приводят к повышенному износу и заклиниванию передачи. Сложность геометрии червяка делает передачу дорогостоящей, поэтому целесообразно увеличивать срок службы данной передачи. Повышение ресурса работы червячной передачи связано со снижением износа зубьев колеса, который превышает износ червяка во много раз [1], [2].

Предлагается для повышения ресурса работы и снижения расхода цветных спла-

вов повысить прочность червячного колеса заменой материала, из которого изготавливается колесо. Вместо алюминиевой или оловянной бронзы использовать низколегированную сталь 40Х, 40ХН, 30ХГТ и др.

Для обеспечения работоспособности такой трибопары необходимо использовать смазку, образующую металлоплакирующие пленки на поверхностях трения.

Известно применение в тяжело нагруженных узлах трения сталь-бронза смазочных материалов на основе ЦИАТИМ-201, свинцоль-01 с порошкообразными присадками оксидов меди, олова и свинца, которые реализуют избирательный перенос, а при высоких нагрузках образуют нанокристаллические структуры [3], [4].

Отмечено [5], что применение металлоплакирующих смазочных материалов, таких как ЦИАТИМ-201 с наполнителем  $\text{Cu}_2\text{O}$  и глицерином, позволяет заменить бронзовые подшипники на чугунные, а также повысить КПД редукторов.

\* Работа выполнена при поддержке гранта Рособразования №2.1.1/4987.

Мельниковым В.Г. и Киселевым В.В. были разработаны смазочные материалы, реализующие избирательный перенос в паре трения сталь-сталь. Смазки на основе масла И-40А содержали стеараты меди и олова до 1,5% [6]. Было отмечено, что эффект реализуется при давлении в контакте около 5МПа. Другие авторы отмечают давление в контакте менее 3 МПа, а также от 7,5 до 10 МПа [3] и от 5 до 7 МПа [5].

Химическая активность поверхностей металла, смазочного материала существенно влияет на прочность адсорбционной пленки. Наиболее прочные адсорбционные слои на металлах образуют поверхностно-активные вещества (ПАВ), такие как жирные кислоты, их спирты и эфиры, животные и растительные жиры, а также амины, амиды и их производные. Наибольшее увеличение действия жирных кислот и их мыл наблюдается на стали.

Задача исследования состояла в оптимизации состава смазочной композиции и определении эффективности действия при высоких давлениях, а также в выяснении механизма смазочного действия.

Эксперимент заключался в следующем. В качестве антифрикционных присадок в смазочную композицию вводили стеараты пластичных металлов Cu, Sn – они образуют на поверхности трения пленки, понижающие коэффициент трения, износ и предохраняют от схватывания. А также стеараты высокопрочных металлов Ni и Co, которые стоят по электродному потенциалу за Cu и Sn, плакируются в образованные пленочные структуры, создавая высокие свойства износостойкости подобно баббиту. Помимо этого на ювенильных поверхностях стали Ni и Co образуют твердые растворы при малых концентрациях и хорошо соединяются с Fe, так как степень недостройки d – электронной орбитали мала для Ni – 2 ( $4S^23d^8 - 2$ ), для Co – 3 ( $4S^23d^7-3$ ). Это дает возможность процесса охрупчивания осажденных твердых оксидов на поверхностях трения и исключения эффекта задира, так как Co и Ni имеют высокие свойства задиростойкости.

Известно, что чем больше степень химической активности металла и по-

верхностей, активности смазочного материала, тем меньше сила трения, поэтому оптимизация состава металлоплакирующей присадки в смазке проводилась по коэффициенту трения. В качестве присадок использовались стеараты Ni, Co, Cu и Sn. Экспериментальные смазочные композиции изготавливались на основе смазки МС-20. При проведении данного эксперимента приняты допущения, связанные с точностью введения % масс. компонентов стеаратов металлов в смазку, так как расчетные доли округлялись для практической реализации состава композита.

Был применен последовательный симплексный метод планирования эксперимента, позволивший найти оптимальные составы смазочных композиций. Перемещение симплекса было прекращено из-за появления колебаний у одной из граней [7].

Для определения коэффициента трения использовалась установка СМТ-1, работающая по схеме диск-колодка. Результаты испытаний составов смазок, выбранных симплекс-методом, проведенных на машине трения СМТ-1 по схеме диск-вкладыш, представлены на рис. 1.

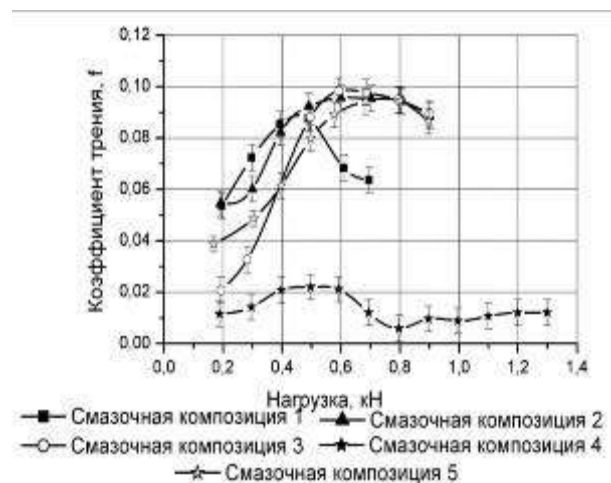


Рис. 1

При проведении исследований на установке СМТ-1 использовали ролики диаметром 40 мм, шириной 10 мм, в качестве образцов использовали вкладыши размером 10x10 мм. Испытания проводились при условии граничной смазки. Режимы испытаний: скорость скольжения

$V=0,2...1,8$  м/с, нагружение ступенчатое от 0,2 до 1,3 кН. Перед испытанием вкладыши и ролики приводились к исходной шероховатости (8 класс) путем шлифования и полирования. Как видно из рис. 1, четвертая смазочная композиция реализует наименьшее трение от 0,012 при нагрузке 200 Н до 0,02 – при нагрузке 600 Н.

При работе редуктора может меняться направление вращения червяка, что приводит к наибольшему износу. Для воссоздания подобного режима эксплуатации червячной передачи была создана установка, работающая по схеме образец-плоскость и моделирующая возвратно-поступательное движение. Линейная скорость перемещения до 0,2 м/с. Нагрузку в эксперименте изменяли от 265 до 88 Н. В результате создавалось давление от 700 до 20 МПа.

Смазка на поверхность плоскости подавалась капельным способом. В процессе трения происходит изнашивание поверхности диска и плоскости.

Площадку износа измеряли с помощью оптического микроскопа. Ошибка измерения составляла 2,5 мкм.

Ранжирование смазочных композиций, выбранных симплекс-методом, по интенсивности изнашивания диска в присутствии смазок 1...5, МС-20, А158 за путь трения 0,58 км приведено на рис. 2. Приведены данные по изнашиванию диска – сталь 40Х (НВ 380) по плоскости – сталь 45 (НВ 420), нагрузка на диск 265 Н. Вязкость смазок не является решающим фактором, однако

у смазки № 3 – наибольшая вязкость, что проявляется в начальный период износа от 0,2 до 0,4 км. Интенсивность изнашивания в этот период имеет ранжирование по возрастанию: 3, 4, 5, 1, 2.

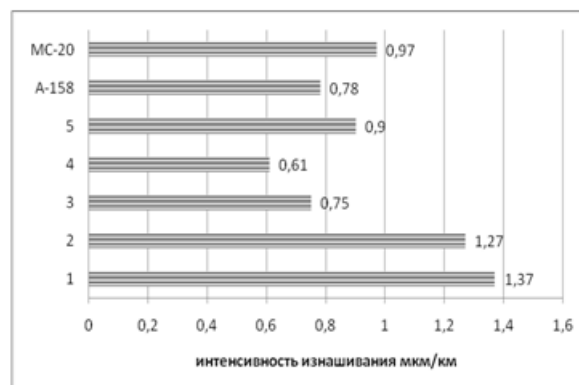


Рис. 2

Дальнейший процесс трения изменяет ранжирование: 4, 3, 5, 2, 1. Анализ результатов по исследованию изнашивания показывает, что 4-й вариант смазки рабочей матрицы является оптимальным не только с точки зрения износостойкости материалов, но и по наименьшему коэффициенту трения исследуемой трибопары. Это подтверждает, что композиционная смазка 4 в процессе трения создает на трущихся поверхностях антифрикционные и износостойкие пленки.

В табл. 1 и 2 приводятся сравнительные данные по изнашиванию стали 40Х в присутствии смазки 4 и в масле МС-20.

Т а б л и ц а 1

Путь трения, км	Износ, мм	Нагрузка, Н	Давление, Мпа	Интенсивность изнашивания, $\cdot 10^{-6}$
0,4	0,33	176	178	0,83
0,9	0,5	176	117	0,56
1,7	0,63	176	93	0,37
2,5	0,77	176	77	0,31
2,9	0,83	176	70	0,29
0,2	0,19	88	152	0,97
1,3	0,32	88	92	0,25
2,1	0,45	88	65	0,21
3,1	0,84	88	35	0,27

Путь трения, км	Износ, мм	Нагрузка, Н	Давление, Мпа	Интенсивность изнашивания, $\cdot 10^{-6}$
0,2	0,63	176	93	3,17
0,4	0,70	176	84	1,75
0,6	0,77	176	77	1,28
1,3	0,77	176	77	0,59
2,3	0,83	176	70	0,36

На рис. 3 приведены кривые износа диска в присутствии смазки 4 и в масле МС-20 на пути трения от 0,2 до 3 км. Уменьшение давления в контакте влияет на интенсивность изнашивания. Скорость изнашивания нелинейно зависит от давления. Кривые износа позволяют утверждать, что на износ влияют граничные смазочные слои.

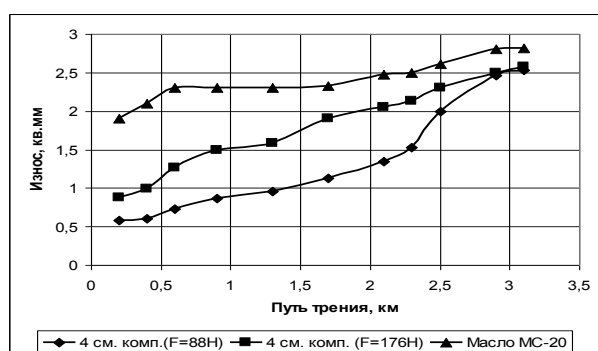


Рис. 3

По результатам исследований изнашивания проведен регрессионный анализ. Статистические результаты в регрессионном анализе вычислялись методом наименьших квадратов.

Изнашивание  $J$  ( $\text{мм}^2$ ) в зависимости от пути трения  $l$  (км) является степенной моделью при корреляции выше 0,9 вида:

$$J = A \cdot l^b, \quad (3)$$

композиционная смазка:

$$\text{нагрузка 88 Н} \quad J = 1,1 l^{0,46}, \quad (2)$$

$$\text{нагрузка 176 Н} \quad J = 1,52 l^{0,45}, \quad (3)$$

смазка МС-20:

$$\text{нагрузка 176 Н} \quad J = 2,3 l^{0,1}. \quad (4)$$

Коэффициенты пропорциональности  $A$  в формулах (2), (3), (4) имеют размерность скорости изнашивания и показывают для данного давления, вида трибоконтакта, какая из смазочных композиций эффективнее

снижает износ. Например, смазка 4 при нагрузке 176 Н снижает изнашивание пары трения по сравнению с маслом МС-20 при нагрузке 176 Н. Они имеют коэффициенты пропорциональности 1,52 (модель (3)) и 2,3 (модель (4)) соответственно.

Зависимость изнашивания от давления в контакте, также показывают коэффициенты  $A$  в моделях. Например, одна и та же смазка 4 при нагрузке 88 Н и 176 Н (модели 2 и 3 имеют коэффициенты  $A$  1,1 и 1,52 соответственно).

В свою очередь, показатель степени  $b$  в моделях 2, 3, 4 характеризует способность смазки к образованию физических и химических смазочных слоев на поверхности трения: чем показатель степени больше, тем выше активность смазки. Величина показателя степени может быть  $0 < b < 1$ . Примером могут служить модели 3 и 4: для смазки 4 параметр  $b = 0,45$ , а для масла МС-20  $b = 0,1$ . Компоненты смазки №4 повышают противоизносные свойства масла МС-20.

Смазочная способность присадок к маслам определяется давлением в контакте, температурой, концентрацией и наличием катализаторов или наличием ювенильной поверхности. Пример модели 2 и 3, показатель степени  $b = 0,45$  и  $b = 0,46$  для одной и той же смазки №4 но при различных давлениях.

Ход кривых на рис. 3 показывает, каким образом меняется трибоактивность от давления в трибоконтакте.

Интенсивность изнашивания стали 40Х по стали 45 в исследуемой композиционной смазке №4 меньше в 1,6 раза по отношению к интенсивности изнашивания этой пары, работающей в масле МС-20.

При увеличении прикладываемых нагрузок время приработки поверхностей сокращается и площадь быстрее достигает

некоторого предельного значения, а для смазочной композиции №4 характер зависимости износа от пройденного пути при увеличении нагрузки становится более пологим, что свидетельствует о повышении износостойкости. При увеличении нагрузки предел износа находится значительно ниже, чем для смазки МС-20, что также указывает на повышение износостойкости.

На основании вышесказанного можно заключить. Механизм смазочного действия реализуется следующим образом. Все присадки, которые были использованы в эксперименте, адсорбируются на стальной поверхности трибопары, образуя смазочные слои поверх оксидных пленок. Входящие в состав металлических мыл ионы меди, олова, никеля и кобальта вытесняются из соединений железом, так как находятся в ряду напряжений металлов правее железа, а затем вступают в химическое взаимодействие с поверхностью, образуя электролитические покрытия.

Рассмотрим представленную схему:

Li, K, Ba, Ca, Na, Mg, Al, Mn, Zn, Cr, Fe, Co, Sn, Pb, H<sub>2</sub>, Cu, Hg, Ag, Au.

Использованные в эксперименте ионы металлов подчеркнуты. Хром и железо замещают ионы, расположенные правее в ряду. Состав смазочной композиции №4, определенный из симплекс-метода, в своем составе содержит 1,5% масс. меди, 1,5% масс. Олова, 2,95% масс. никеля и 1,12% масс. кобальта.

Разрушение поверхности при трении приводит к обогащению смазки частицами и ионами железа и хрома, с одной стороны, а с другой – к осаждению на поверхности меди, олова, никеля и кобальта. При этом никель характеризуется высокой коррозионной стойкостью – устойчив в воздухе, в воде, в щелочах, в ряде кислот. Покрывая поверхность трения, никель легко окисляется и образует достаточно плотную оксидную пленку, которая защищает его от дальнейшего окисления. Таким образом, чем больше сила сжатия в трибоконтakte, тем активнее и быстрее идет процесс замены атомов железа атомами никеля.

Возможно образование интерметаллических соединений с кобальтом и никелем на поверхности трения FeCo, FeNi<sub>3</sub>, оксидов, образование неограниченных твердых растворов и ограниченных с медью, а также эвтектик. Одни из элементов имеют примерно одинаковый радиус атома и могут свободно замещать железо в кристаллической решетке (например, никель и кобальт), а другие имеют больший радиус атома и с трудом растворяются в кристаллической решетке железа, располагаясь по границам кристаллитов. Это медь и олово. Это же доказывают микроскопические исследования других авторов [4].

## ВЫВОДЫ

1. Определен оптимальный состав смазки для червячных передач, работающих в паре трения сталь-сталь, с содержанием компонентов 1,5% масс. меди, 1,5% масс. олова, 2,95% масс. никеля и 1,12% масс. кобальта; остальное масло МС-20.

2. Применение оптимальной смазочной композиции снижает износ пары сталь 40Х - сталь 45 в 1,6 раза, по сравнению с промышленно применяемыми составами.

3. Снижен коэффициент трения в трибопаре сталь 40Х - сталь 45 до 0,012 за счет применения предлагаемых присадок. Увеличена нагрузка задира в 1,5...2 раза.

4. Предложена гипотеза смазочного действия стеаратов меди, олова, кобальта и никеля при давлениях выше 10 МПа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Попов П.К. Прогноз долговечности по износу отечественных червячных редукторов общемашиностроительного применения // Вестник машиностроения. – 2005, №10. С. 8...14.

2. Павлов В.Г., Попов П.К., Селиверстов Е.Ю., Семидоцкий Н.В. Ресурс работы червячной передачи по условию предельно допустимого износа // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2007, №5. С. 19...25.

3. Дякин С.И., Филатова Т.П. Некоторые концепции применения материалов в тяжело нагруженных трибосопряжениях // Сб. ст.: Долговечность трущихся деталей машин. Вып. 2 // Под ред. Д.Н. Гаркунова. – М.: Машиностроение, 1987. С.19...31.

4. *Золотухина Л.В. и др.* Формирование нанокристаллической структуры на поверхностях трения в присутствии нанопорошков сплавов меди в смазочном материале // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2007, № 3. С.7...12.

5. *Гаркунов Д.Н.* Триботехника. – М.: Машиностроение, 1985.

6. *Киселев В.В., Мельников В.Г.* Исследование свойств разработанных присадок на основе солей

мягких металлов // Эффект безызносности и триботехнологии. – 2004, №1. С.16...20.

7. *Чичнев Н.А.* Автоматизация экспериментальных исследований (организация эксперимента)/ Под ред. Акад. П.И. Полухина. – М.: Металлургия, 1983.

Рекомендована кафедрой проектирования текстильных машин ИГТА. Поступила 01.04.10.

---