

УДК 621.891.031

ТРЕНИЕ И ИЗНОС ЭЛЕМЕНТОВ ВАКУУМНЫХ ВОЛНОВЫХ ПЕРЕДАЧ**Ивашов Е.Н., Константинов Ю.А., Панфилова Е.С., Шихов А.И.***ФГАОУ ВПО НИУ «Высшая школа экономики», Москва, e-mail: eivashov@hse.ru*

К механизмам и узлам, работающим в вакууме, в настоящее время предъявляются все возрастающие требования в отношении надежности и долговечности. Наряду с этим наблюдается тенденция к ужесточению условий эксплуатации – вакуум до 10^{-7} Па, температура от «космического холода» до 900°C , интенсивная радиация, вибрации и т.д. Для уменьшения в этих условиях явлений пластического сдвигообразования и адгезии в отечественной и зарубежной практике применяется ряд новых видов смазок, самосмазывающих материалов и металлопокрытий. Вакуумные смазывающие материалы делятся на следующие группы: твердые смазки слоистого кристаллического строения, самосмазывающиеся полимеры, металлические покрытия, различные композиционные материалы.

Ключевые слова: трение и износ, вакуумные волновые передачи, вакуумные смазывающие материалы

FRICITION AND WEAR OF THE ELEMENTS OF THE VACUUM WAVE TRANSMISSION**Ivashov E.N., Konstantinov Y.A., Panfilova E.S., Shikhov A.I.***National research university «High school of economics», Moscow, e-mail: eivashov@hse.ru*

The mechanisms and nodes operating in a vacuum, currently meet the increasing demands in terms of reliability and durability. Along with this, there is a trend towards tightening conditions – vacuum 10^{-7} PA, the temperature of the cosmic cold» to 900°C , intense radiation, vibration, etc. To reduce this phenomena plastic savegeometry and adhesion in domestic and foreign practice a number of new types of lubricants, samonazva materials and metal coatings. Vacuum lubricants are divided into the following groups: solid lubricants layered crystal structure, self-lubricating polymers, metal plating, various composite materials.

Keywords: friction and wear, vacuum wave transmission, vacuum lubricants

Изучение комплекса сил трения в элементах волновых передач должно опираться на фундаментальные исследования в области трения скольжения [1, 2, 3].

В настоящее время доминирует молекулярно-механическая теория трения. Из существующих теорий (адгезионной, адгезионно-деформационной, молекулярной, молекулярно-кинетической) она наиболее полно описывает процесс внешнего трения.

Согласно этой теории в контакте двух тел всегда присутствует «третье тело», которое представляет собой ослабленный слой – пленку, состоящую из смазок, окислов, адсорбированных газов, паров воды и различных загрязнений [4]. Эта тонкая пленка служит демпфером между обоими телами и локализует в своем объеме основные контактные деформации. В случае больших контактных усилий между трущимися поверхностями в деформацию вовлекаются нижележащие слои. Это определяется двойственным характером молекулярно-механической теории трения.

Интенсивность износа Jh определяется как объем материала ΔV , удаленный с единицы номинальной поверхности на единичном пути трения [4], т.е.

$$Jh = \frac{\Delta V}{AaL} = \frac{\Delta h}{L}, \quad (1)$$

где Aa – номинальная площадь касания; L – путь трения; Δh – средняя толщина изношенного слоя.

После преобразования формулы интенсивности износа для разных видов контакта таковы:

– упругий контакт

$$Jh = 0,7 \frac{Pa}{En}; \quad (2)$$

– пластический контакт

$$Jh = \frac{0,14}{n} \sqrt{\frac{h_m}{R}} \left(\frac{Pa}{C\sigma_s} \right)^{\frac{5}{4}}; \quad (3)$$

– абразивный износ в контакте (микрорезание)

$$Jh = \frac{0,14}{n} \sqrt{\frac{h_{\max}}{R}} \left(\frac{Pa}{C\sigma_s} \right)^{\frac{5}{4}}, \quad (4)$$

где Pa – номинальное давление; E – модуль упругости; n – число циклов, приводящих к разрушению; C – коэффициент пропорциональности; σ_s – предел текучести более мягкого материала; R – радиус моделируемой сферы; h_m – глубина внедрения; h_{\max} – максимальная глубина внедрения.

Количество циклов нагружения, необходимое для разрушения, зависит от усталостной прочности исходного материала. Если число рабочих циклов велико, то наблюда-

ется фрикционно-контактный усталостный процесс. Если контактные напряжения достигают предела прочности материала, разрушение наступает после первых же циклов воздействия нагрузки. При этом характерны наиболее интенсивные виды износа: абразивный (микрорезание), когда внедрение выступов контртела велико, и когезионный процесс (схватывание), когда силы трения достигают значения предела прочности [4].

Согласно работам Елифанова Г.И., поверхности твердых тел, как бы тщательно они ни были изготовлены, всегда обладают шероховатостью и волнистостью. Внедрение микронеровностей одной поверхности в другую и зацепление неровностей сопряженных поверхностей сопровождается адгезией, возникающей на предельно чистых поверхностях, сближенных до расстояния порядка радиуса действия молекулярных сил. Поэтому «основным содержанием процесса трения предельно чистых поверхностей трения является пластическое сдвигообразование, развивающееся в тонких поверхностных слоях трущихся тел».

В то же время к механизмам и узлам, работающим в вакууме, в настоящее время предъявляются все возрастающие требования в отношении надежности и долговечности. Наряду с этим наблюдается тенденция к ужесточению условий эксплуатации – вакуум до 10^{-7} Па, температура от «космического холода» до 900°C , интенсивная радиация, вибрации и т.д. Для уменьшения в этих условиях явлений пластического сдвигообразования и адгезии в отечественной и зарубежной практике применяется ряд новых видов смазок, самосмазывающих материалов и металлопокрытий.

Вакуумные смазывающие материалы делятся на следующие группы:

1. Твердые смазки слоистого кристаллического строения – соединения тяжелых металлов.

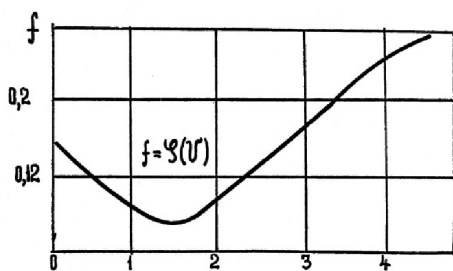


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения MoS_2 от температуры

2. Самосмазывающиеся полимеры – используемые как в чистом виде, так и с наполнителями.

3. Металлические покрытия (галлий, свинец, серебро, золото и др.).

4. Различные композиционные материалы на базе порошков металлов и смазок первых трех групп.

Твердые смазки обычно наносятся на поверхность трения в виде покрытий. В состав покрытия входит основная твердосмазочная компонента и связующее вещество, обеспечивающее прочность покрытия и имеющее хорошую адгезию с основным металлом, а также различные добавки. В качестве смазки используют синтетические смолы: фенольные, эпоксидные, ароматические полиэфирные и силиконовые соединения. Однако наиболее существенное значение имеют свойства основной твердой смазки, входящей в состав покрытия. Твердосмазочные покрытия на основе дисульфида молибдена (ВНИИ НП – 209, ВНИИ НП-213, ВНИИ НП-229, ВНИИ НП-230) целесообразно использовать для зубчатых венцов волновых вакуумных передач.

Для работы в глубоком вакууме порошки твердых смазок можно прессовать с порошками матричных материалов (медь, никель, серебро, золото) и из этих композиций изготавливать сепараторы для подшипников качения и планетарных генераторов волновых вакуумных передач.

Из всех твердых смазок наиболее изучен дисульфид молибдена, который широко применяется. Как показали испытания, проведенные в ИМАШе, смазка MoS_2 работоспособна в вакууме до 1100°C , при давлении до 10^{-5} Па. Экспериментальные результаты некоторых исследований смазки MoS_2 представлены на рисунках 1, 2, 3. Работоспособность твердых смазок в условиях глубокого вакуума для пар трения скольжения изучалась Куриловым Г.В., Сентюрихиной Л.Н., Южно Г.П., Любарским Н.М., Вайнштейн В.Э. [5].

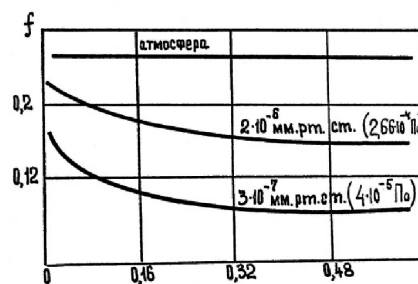


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения MoS_2 от скорости скольжения и глубины вакуума

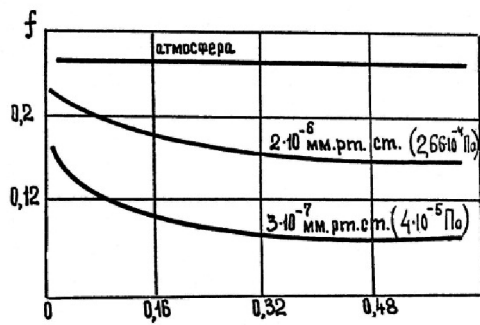


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения

Механизм работы твердосмазочного покрытия на основе MoS_2 рассмотрен в работе. В последние годы проводятся изыскания новых видов твердых смазок с более высокими эксплуатационными свойствами. Изучаются некоторые соединения тяжелых металлов: хрома, вольфрама, ванадия, тантала, рения, урана и т.д.

Вторая разновидность материалов, предназначенных для работы в вакууме, – это различные полимеры, обладающие малым коэффициентом трения в контакте с металлом.

Износ чистых полимерных материалов в контакте с металлами достаточно изучен. Причиной износа металла в этом случае является образование продуктов механического разрушения молекулярных цепей – свободных макрорадикалов, что влечет за собой активизацию разрушения поверхности металла [6]. Несмотря на наличие большого числа самосмазывающих полимерных материалов композиционного состава, до сих пор не существует теории, объясняющей смазочный эффект каждого из наполнителей. Большинство композиционных материалов в настоящее время создается эмпирическим путем, причем каждый новый материал необходимо тщательно исследовать не только на образцах, но и на реальных объектах. Однако лишь немногие из полимеров удовлетворяют требованиям, предъявленным к вакуумным самосмазывающим материалам. Эти требования: а) антифрикционность в широком диапазоне остаточных давлений и воздействий внешней среды; б) высокая износостойкость; в) способность к образованию устойчивой тонкой пленки на металле; г) широкий температурный интервал работы [6].

В большей или меньшей степени этим условиям удовлетворяют из ранее извест-

ных полимеров – нейлон, фторопласт, из новых – полиимид, дифлон, ацеталь и ряд других. Самосмазывающие полимеры относительно редко применяются в чистом виде, чаще всего они служат основой различных композиций, например АСП – пластики ИНЭОС АН СССР.

Тонкие пленки из мягких металлов – галлия, свинца, цинка, меди, алюминия, серебра, золота – наносятся на поверхности трения в качестве «третьего тела» для предотвращения схватывания и глубинного вырывания. Для волновых вакуумных зацепления могут применяться все выше упомянутые металлопокрытия. Металлические пленки обеспечивают широкий диапазон рабочих температур от -240 до 1100 °С. Их основной недостаток – невосстанавливаемость во время работы и невысокая долговечность.

Вакуум определяет ход физико-химических процессов в зоне трения зубчатого зацепления волновой передачи. При установившемся процессе трения время воздействия среды на поверхность трения ограничено временем существования единичного пятка контакта [7] и критическим временем t_c в течение которого поверхность трения в вакууме существенно изменяет свои фрикционные свойства. Если отношение

$$\frac{t}{t_c} \ll 1, \text{ то влияние вакуума слабое;}$$

$$\frac{t}{t_c} \gg 1, \text{ то влияние вакуума значительное.}$$

С практической точки зрения важно определить предельное разрежение, начиная с которого влияние вакуума на процессы трения и износа становится наиболее интенсивным. Поэтому критическое давление, при котором параметр $\frac{t}{t_c} \gg 1$, равно

$$P_{\text{кр}} \leq \frac{12km}{\alpha t} \sqrt{\frac{MT}{3R}}, \quad (5)$$

где K – постоянная Больцмана; T – температура, К; $P_{\text{кр}}$ – давление в сосуде, Па; m – число молекул, необходимое для образования монослоя на площади 1 см^2 ($m=10^{14} \text{ см}^{-2}$); α – вероятность осаждения молекул на чистой поверхности при ударе ($\alpha=0,1$); M – молекулярный вес газа ($M=30$); R – универсальная газовая постоянная.

Важно знать также и отношение

$$\frac{t}{t_c} = \frac{\alpha P \Delta}{12 km V J} \sqrt{\frac{3R}{MT}}, \quad (6)$$

которое позволяет теоретически оценить влияние вакуума на процессы трения износа.

Здесь Δ – толщина частиц износа; V – скорость скольжения; J – интенсивность линейного износа.

При выборе твердой смазки для волнового зубчатого зацепления и самосмазывающихся материалов для сепараторов планетарных генераторов волн следует учитывать газовыделение этих материалов, которое, с одной стороны, приводит к увеличению давления в камере, с другой стороны, – к «загрязнению» вакуумного технологического объема. К вакуумным объемам, в которых происходят технологические процессы напыления и сборки приборов, предъявляются жесткие требования к составу остаточных газов. В работе [4] приводятся характеристики газовой выделенности некоторых твердых смазок и самосмазывающихся материалов (рис. 4).

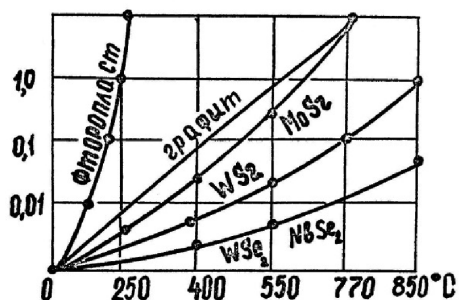


Рис. 4. Газовыделение некоторых твердых смазок и самосмазывающихся материалов в вакууме $P=1,33 \cdot 10^{-4}$ Па

Оценка кинетики газовой выделенности твердых слоистых смазок с изменением температуры рассмотрена в работе [4]. В Физико-техническом институте низких температур АН УССР Кириловым Г.В. и во ВНИИ НП Сентюрихиной Я.Е. [5] изучено газовой выделение при трении твердосмазочных покрытий типа ВНИИ НП-209, 213, 229, 230, 250 в вакууме.

В Научно-исследовательском институте вакуумной техники под руководством Плещекко Е.К. проведены исследования по газовой выделенности и масс-спектрометрии фторопласта и композиционных материалов на

его основе. Термическое разложение этих материалов начиналось при температурах свыше 250°C . Фтор и фтористый водород, являющиеся опасными соединениями для некоторых технологических процессов в производстве электронной техники, обнаружены при температурах $200\text{--}240^\circ\text{C}$ (рис. 5). Резкое увеличение количества фтора и фтористого водорода происходило при температурах $350\text{--}360^\circ\text{C}$. Исследования показали, что предварительно обезгаженные образцы чистого фторопласта (при $t = 100^\circ\text{C}$ в течение четырех часов) дают меньшие пики интенсивности фтора и фтористого водорода.

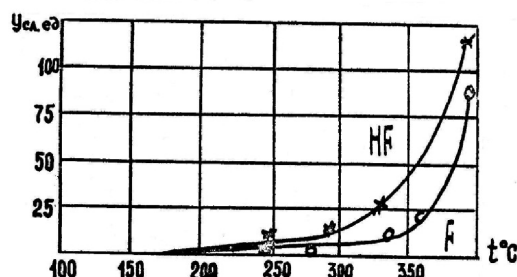


Рис. 5. Зависимость интенсивности пиков фтора F и фтористого водорода HF от температуры

При повышении рабочей температуры до 500°C в спектре появляются тяжелые массы – C_2F_3 , C_2F_4 , C_3F_5 , C_3F_6 . Первые признаки разложения составляющей компоненты – дисульфида молибдена появлялись при температуре свыше 400°C , что характеризовалось наличием в спектре массовых чисел для серы и SO_2 .

На основании вышеизложенного, можно сделать выводы и наметить следующие задачи исследования:

1. Волновые передачи можно использовать в качестве вводов вращения и путем непосредственной установки в вакуумный объем.

2. Вакуум оказывает существенное влияние на фрикционные характеристики взаимодействующих материалов. Поэтому представляет значительный интерес исследование износостойкости материалов вакуумных волновых передач, а также к.п.д. этих передач в целом.

3. Для уменьшения трения скольжения в вакууме можно применять:

а) твердые смазки и твердосмазочные покрытия на основе MoS_2 ;

б) самосмазывающие материалы на основе фторопласта-4 и полиимидов;

в) тонкие металлические пленки (Au, Ag, Pb и т.д.).

4. Недостаточно полно исследованы волновые передачи с планетарным генератором волн, особенно в вакуумном исполнении.

5. Изучение волновых передач с планетарным генератором, при одновременной оценке эффективности смазок, самосмазывающих материалов и металлопокрытий требует специальной вакуумной оснастки, обеспечивающей работу как генератора, так и зубчатых венцов непосредственно в вакууме.

6. Отсутствуют работы по исследованию кинематики зацепления волновой передачи с планетарным генератором волн.

7. Нет рекомендаций по выбору материалов для сепараторов планетарных генераторов волн, а также по влиянию геометрических параметров генератора на характер и интенсивность износа сепараторов.

Главной задачей исследования является создание инженерной методики расчета вакуумных волновых передач с планетарными генераторами волн (ПВГ).

Выполнение этой задачи возможно только при получении экспериментально подтвержденных теоретических формул, которые бы полностью учитывали геометрические, кинематические и прочностные зависимости для планетарных волновых генераторов.

В ряде НИИ России созданы новые самосмазывающие материалы для сепараторов подшипников, работающих в вакууме. К ним предъявляются жесткие требования по газовыделению и износостойкости. Поэтому только испытания в условиях, близких к эксплуатационным, могут решить вопрос об использовании их в качестве материалов для сепараторов вакуумных генераторов волн.

Список литературы

1. Белый В.А., Свириденко А.И., Петроковец М.И., Савкин В.Г. Трение и износ материалов на основе полимеров. – Минск: Наука и техника, 1976.

2. Васин В.А., Ивашов Е.Н., Кузнецов П.С., Степанчиков С.В. Системы приводов для работы в сверхчистой вакуумной технологической среде // Приводная техника. – М. – 2011. – №1. – С. 37–38.

3. Васин В.А., Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В. Методы проектирования приводов и функциональных устройств вакуумного модульного оборудования // Приводная техника. – М. – 2011. – №3. – С. 23–33.

4. Васин В.А., Ивашов Е.Н., Кузнецов П.С., Степанчиков С.В. Проектирование внутрикамерных устройств вакуумного оборудования для экологически чистых и энергосберегающих технологий. Электромагнитные волны и электронные системы. – М., 2011. – Т.16. – С. 49–54.

5. Крагельский И.В. Трение и износ в вакууме – М.: Машиностроение, 1973.

6. Курилов Г.В., Сентюрихина Л.Н., Юхно Т.П., Любарский И.М. Исследование работоспособности твердых смазочных покрытий // Поведение материалов в условиях вакуума и низких температур. – Харьков, 1972.

7. Силин А.А. Методы оценки влияния окружающей среды на процессы внешнего трения и износ // Научные принципы и новые методы испытания материалов для узлов трения. – М.: Наука, 1972.

References

1. Belyj V.A., Sviridenok A.I., Petrokovec M.I., Savkin V.G. Trenie i iznos materialov na osnove polimerov. – Minsk: Nauka i tehnika, 1976.

2. Vasin V.A., Ivashov E.N., Kuznecov P.S., Stepanchikov S.V. Sistemy privodov dlya raboty v sverchchistoj vakuumnoj tehnologicheskoy srede // Privodnaya tehnika. – M., 2011. – №1. – pp.37-38.

3. Vasin V.A., Ivashov E.N., Stepanchikov S.V. Metody proektirovaniya privodov i funktsionalnykh ustrojstv vakuumnogo modul'nogo oborudovaniya // Privodnaya tehnika. – M. – 2011. – №3. – pp. 23–33.

4. Vasin V.A., Ivashov E.N., Kuznecov P.S., Stepanchikov S.V. Proektirovanie vnutrikamernykh ustrojstv vakuumnogo oborudovaniya dlya ekologicheski chistykh i energosberegatelnykh tehnologij/ E'lektromagnitnye volny i e'lektronnye sistemy. – M. – 2011. – Т.16. – pp. 49–54.

5. Kragelskij I.V. Trenie i iznos v vakuume. – M.: Mashinostroenie, 1973.

6. Kurilov G.V., Sentyurixina L.N., Yuxno T.P., Lyubarskij I.M. Issledovanie rabotosposobnosti tverdyykh smazochnykh pokrytij // Povedenie materialov v usloviyax vakuuma i nizkix temperatur Xarkov, 1972.

7. Silin A.A. Metody ocenki vliyaniya okruzhayushchey sredy na processy vneshnego treniya i iznos // Nauchnye principy i novye metody ispytaniya materialov dlya uzlov treniya. – M.: Nauka, 1972.