

УДК: 621.793.79

Арзыматов Б. М., преподаватель
Arzymatov_bolot@mail.ru
ИГУ им. К. Тыныстанова, Кыргызстан

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНТАКТНОГО МАССАПЕРЕНОСА ПОКРЫТИЙ НА ВАКУУМНЫХ ПОДШИПНИКАХ

Представлено моделирование процесса нанесения твёрдосмазочных покрытий (ТСП) на деталях вакуумных подшипников методом контактного массопереноса. Одним из перспективных представляется метод контактного массопереноса (МКМ), разработанный на кафедре «Электронные технологии в машиностроении» Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана под руководством д.т.н. Л. И. Волчкевича и к.т.н. И. Л. Волчкевича. Поскольку работы, посвященные применению данного метода к нанесению твердосмазочных покрытий, являются малоизученными, то задачей исследования было определение технологических режимов его осуществления и долговечности покрытия при его работе в вакууме. Рассмотрена физико-математическая модель процесса контактного массопереноса.

Ключевые слова: метод контактного массопереноса, моделирование, твёрдосмазочные покрытия, вакуумные подшипники, долговечность покрытия, технологические режимы, вакуум.

Арзыматов Б. М., окутуучу
Arzymatov_bolot@mail.ru
К. Тыныстанов ат. БИМУ

ВАКУУМДУК ПОДШИПНИКТЕРДЕГИ КАПТАМАЛАРДЫ КОНТАКТЫЛЫК МАССА МЕНЕН ӨТКӨРҮҮ ПРОЦЕССИН МОДЕЛДӨӨ

Вакуумдук подшипниктердин тетиктерине катуу майлоочу каптамаларды контактылык масса менен өткөрүү процессин моделдөө көрсөтүлгөн. Эң келечектүүлөрдүн бири болуп Н. Э. Бауман атындагы Москва мамлекеттик техникалык университетинин «Машина куруудагы электрондук технологиялар» кафедрасында т. и. д. Л. И. Волчкевичтин жана т. и. к. И. Л. Волчкевичтин жетекчилиги астында иштелип чыккан контактылык массаны өткөрүү ыкмасы саналат. Бул ыкманы катуу майлоочу каптамаларда колдонууга арналган иштер начар изилденгендиктен, изилдөөнүн милдети аны ишке ашыруунун технологиялык режимдерин жана вакуумда иштетилгенде жабуунун узакка туруктуулугун аныктоо болгон. Контактылык масса өткөрүү процессинин физика-математикалык модели каралды.

Өзөктүү сөздөр: контактылык масса өткөрүү ыкмасы, моделдөө, катуу майлоочу каптамалар, вакуумдук подшипниктер, каптаманын узакка туруктуулугу, технологиялык режимдер, вакуум.

Arzymatov B. M., teacher
K. Tynystanov Issyk-Kul State University, Kyrgyzstan

SIMULATION OF THE PROCESS OF CONTACT MASS TRANSFER OF COATINGS ON VACUUM BEARINGS

The simulation of the process of applying solid-lubricant coatings on the parts of vacuum bearings by the method of contact mass transfer is presented. One of the most promising is the method of contact mass transfer (MCM) developed at the Department of Electronic Technologies in Mechanical Engineering of the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman under the guidance of Doctor of Technical Sciences L. I. Volchkevich and Ph.D. I. L. Volchkevich. Since the works devoted to the application of this method to the application of solid lubricant coatings are poorly studied, the task of the research was to determine the technological modes of its implementation and the durability of the coating when it is operated in vacuum. Physico-mathematical model of process contact mass transfer is considered.

Keywords: *contact mass transfer method, solid lubricant coatings, simulation, vacuum bearings, coating durability, technological regimes, vacuum.*

В вакууме происходит интенсивное испарение обычных жидких и консистентных смазок, сублимация твердых веществ. И скорость этих процессов с увеличением температуры значительно возрастает. В связи с этим использование обычных смазок, применяемых в атмосфере невозможно. Поэтому все большее применение находят узлы сухого трения, элементы которых либо изготовлены из самосмазывающихся конструкционных материалов, либо на них нанесены твердые смазочные покрытия (ТСП). В качестве твердых смазочных материалов применяют различные органические и неорганические соединения, а также тонкие металлические покрытия [1]. Эти покрытия, разделяя поверхности трения от непосредственного контакта, облегчают и ускоряют процесс их приработки, уменьшают коэффициент трения и исключают возможность схватывания и заедания поверхностей при трении. Одним из перспективным представляется метод контактного массопереноса (МКМ) разработанный на кафедре «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э.Баумана под руководством д.т.н. Л.И.Волчкевича и к.т.н. И.Л.Волчкевича [2]. При методе контактного массопереноса (МКМ) покрытий сближение поверхностей, приведение их в тесный контакт и придание дополнительной энергии, необходимой для создания прочной адгезионной связи, обеспечивается высокоэнергетической механической активацией при соударении твердых тел. Детали подшипников, наносимый материал и вспомогательные рабочие тела, составляя единую массу (загрузку), помещаются в специальную технологическую камеру. Далее камера приводится в гармоническое колебательное движение, в результате чего внутри камеры происходят высокоинтенсивные взаимные перемещения и соударения элементов массы. Наносимый материал, попадая между частицами загрузки, деформируется и измельчается, формируя покрытие на деталях. При нанесении ТСП на поверхности подшипников качения покрытие можно наносить либо на шарики, либо на дорожки качения наружных и внутренних колец, так как при работе подшипника происходит перенос ТСП на другие части. Для нанесения

покрытия на различные детали подшипника не требуется специального оборудования. В каждом конкретном случае, операцию предлагается проводить в одной технологической камере, меняя лишь приспособление для закрепления. В качестве рабочих тел при МКМ покрытий на разнообразные поверхности обычно используются шарики (рис. 1.1, а).

В качестве объектов для нанесения покрытия целесообразно использовать прежде всего разборные подшипники, так как в данном случае значительно упрощается процесс сборки. Подшипники с нанесёнными на поверхности качения ТСП собираются обычными методами. В процессе приработки в вакууме происходит перераспределение нанесённого твёрдосмазочного покрытия по поверхностям трения внешнего и внутреннего кольца подшипника, выдавливания “лишнего” материала с образованием равномерного слоя защитного твёрдосмазочного покрытия. Оптимальным, с точки зрения конструктивных и технологических соображений, является покрытие лишь одних шариков.

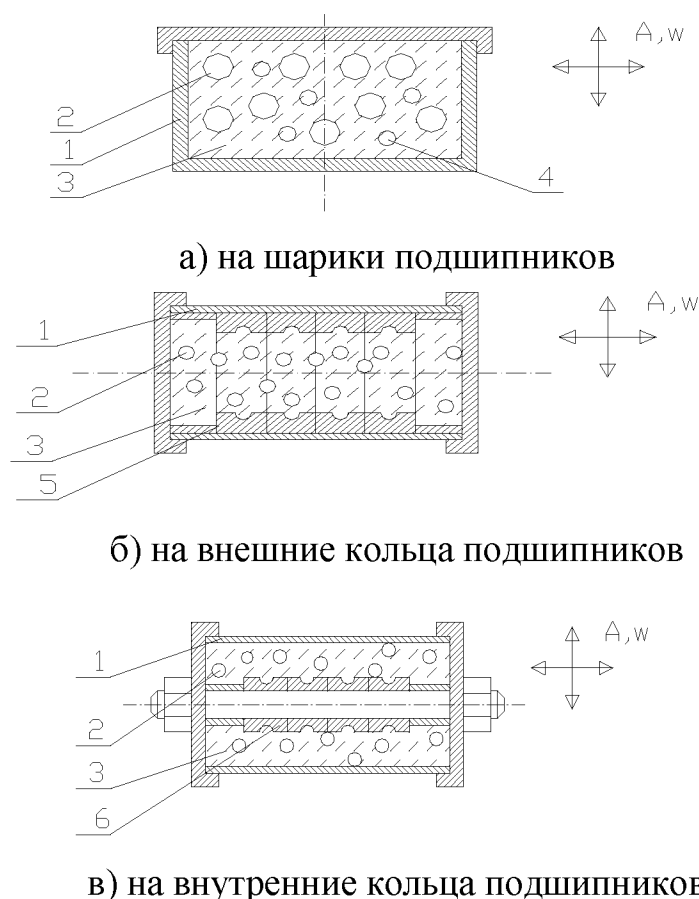


Рис. 1.1. Схемы нанесения покрытий на детали подшипников: 1-технологическая камера; 2 - рабочие тела; 3 - наносимый материал; 4 - шарики подшипников; 5-внешние кольца; 6- внутренние кольца

Рассмотрим процессы, которые происходят при контактном массопереносе твёрдосмазочных покрытий на поверхности деталей. При попадании в зону соударения частицы наносимого материала происходят следующие процессы [3, 4]:

1) Подготовка поверхностей к нанесению покрытий пути удаления поверхностных дефектов, грязи, окислов и т.д. Для МКМ не требуется такой тщательной подготовки поверхности, как при гальванических процессах или вакуумном осаждении; подготовка осуществляется в едином цикле с нанесением покрытий, до тех пор, пока поверхности (посредством тех или иных соударений) не приобретут необходимую степень очистки, покрытия наноситься не будут. Все сказанное относится и к стенкам камеры.

2) Дробление частиц материала на более мелкие, когда ударные напряжения превышают предел прочности материала.

3) Пластическое деформирование (расплющивание) частиц на поверхностях соударений, когда ударные напряжения превышают предел текучести.

4) Когезия наносимого материала к поверхностям элементов загрузки (шариков), когда энергия соударения превышает энергетический барьер и энергию активации, что возможно лишь при обширных зонах взаимного контактирования. При этом происходит разрыв старых связей и формирование новых между слоями материала покрытия и деталями. Следует заметить, что помимо связей между основным и наносимым материалом может возникать и связь между отдельными частицами наносимого материала, что приводит к слипанию этих частиц (агломеризации) или к формированию “островковой” структуры.

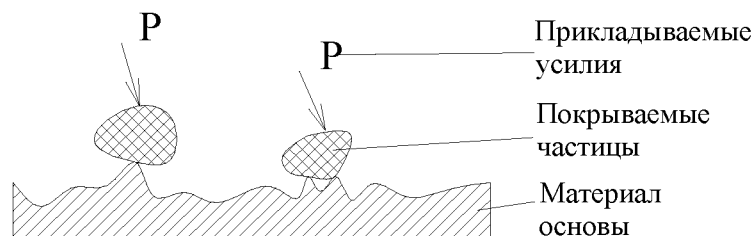
5) Диффузия наносимого материала в поверхность детали.

6) Химическое взаимодействие между материалами покрытия и основы или между компонентами наносимого материала, если их несколько. Доказано, что при ударных взаимодействиях в “нормальных” условиях (комнатная температура, атмосферное давление) происходят твердофазные химические реакции, обычно требующие повышенных температур и давлений. Этот процесс даёт возможность формировать необходимый химический состав покрытия непосредственно в процессе нанесения, используя компоненты, а также создавать многокомпонентные покрытия.

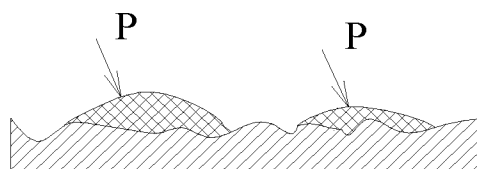
Процессы когезии, диффузии и химического взаимодействия не могут происходить без предварительной очистки поверхностей от загрязнений и приведения их в контакт, то есть этим явлениям предшествует явление микрорезания и пластической деформации (расплющивания) или разрушения частиц, что также приводит к появлению чистых от

загрязнений поверхностей. Таким образом, основные стадии процесса МКМ нам представляются следующими:

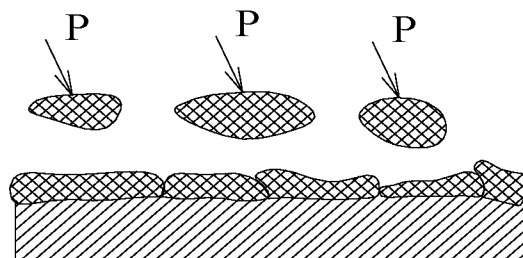
- 1) Образование поверхностей чистых от загрязнений.
- 2) Приведение поверхностей в физический контакт благодаря пластической деформации обоих материалов (сталь по стали). Параллельно идёт процесс разрушения и слипания частиц (рис.1.2, I).
- 3) Формирование когезионных связей и покрытий из “островковых” плёнок (рис.1.2, II).
- 4) Схватывание материалов основы и покрытия. Формирование первого слоя покрытия (рис.1.2, III).
- 5) Формирование последующих слоёв покрытия. Процесс аналогичен предыдущему, только в качестве основы выступает нанесённый ранее слой покрытия. Уплотнение покрытия, создание “регулярного” слоя (рис.1.2, IV).



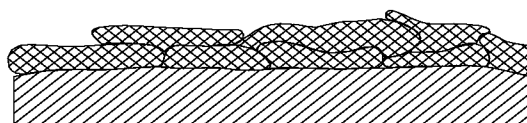
I. Образование чистых поверхностей и приведение их в физический контакт



II. Формирование покрытий из “островковых” плёнок



III. Формирование первого слоя покрытия



IV. Многослойное покрытие. Создание “регулярного” слоя
Рис.1.2. Основные стадии процесса МКМ

Таким образом, физические процессы, связанные с МКМ твёрдосмазочных покрытий весьма сложны и при этом взаимосвязаны. Построение единой математической модели вряд ли возможно, поэтому целесообразно выделить из общего процесса некоторые ключевые фазы, прежде всего с позиции числа технологических режимов. Этими фазами могут служить:

- 1) приобретение шариком кинетической энергии от стенки вибрирующей камеры;
- 2) соударение двух шариков через частицу материала;
- 3) соударение шарика с неподвижной поверхностью (стенка камеры или закреплённые на ней элементы, например, внутренние и наружные кольца подшипников).

При построении математических моделей принимаем следующие допущения (рис. 1.3):

а) начальная фаза “относительного покоя” (рис. 1.3, а) пройдена, процесс установился, приложенная энергия вибраций достаточна для “распушения” всей массы шариков равномерно по объёму камеры (рис. 1.3, б);

б) в каждый момент времени, с учётом кругового, а не прямолинейного характера вибрации, существуют зоны, в которых перемещение элемента поверхности по вектору направлено перпендикулярно к поверхности шарика, который в тот момент окажется в контакте с данным элементом поверхности. В этом случае шарик получает максимальную энергию;

в) шарик, которому сообщается энергия от стены камеры, в данный момент не соприкасается с другими шариками, вследствие равномерного “распушения” по объёму. До соприкосновения и соударения он должен пройти некоторый путь внутри камеры, потеряв при этом часть своей энергии;

г) соударение двух шариков через частицу материала может происходить при полном или неполном заполнении материалом зоны контакта; рассматривается случай полного заполнения зоны;

д) при соприкосновении шарика со стенкой камеры происходит явление косоугольного удара.

Основной задачей построения рассмотренных далее математических моделей является теоретическая проработка границ существования нескольких режимов протекания процесса движений и соударений элементов рабочей среды (в данном случае шариков) [5].

Процессы контактного массопереноса характеризуются тремя реальными характеристиками [6]:

- 1) интенсивностью (частотой) колебаний “ ω ”;
- 2) амплитудой круговых колебаний “ A ”;
- 3) общей длительностью процесса “ t ” (от начала колебаний до формирования покрытия заданной толщины).

Так как возбуждения колебаний традиционно производится от дебаланса, приводимого во вращение двигателем, частота колебаний равна частоте двигателя ($\omega=50$ или 100 герц), её регулировка сложна и поэтому не применяется.

Время процесса “t” определялось экспериментально по достижению необходимого состояния (очистка или нанесения слоя).

Важнейшим режимным параметром, который определяет ход процесса, остается таким образом, амплитуда круговых колебаний “А”, которая в существующих конструкциях легко устанавливается в необходимых пределах или меняется изменением массы или эксцентриситета дебаланса.

С точки зрения амплитудного критерия можно указать следующие постоянные системы (рис.1.3):

1) при минимальных амплитудах $0 < A^I \leq A_1$ происходят колебания камеры с загруженной массой как единого целого, с возможностью некоторого пересыпания или перемешивания (рис.1.3, а);

2) в диапазоне $A_1 < A^{II} \leq A_2$ приходит “распушение” массы загрузки, отрыв и подбрасывание шариков, вплоть до полного заполнения массой всего объема камеры (рис.1.3, б);

3) в диапазоне $A_2 < A^{III} \leq A_3$ происходит не только “распушение”, но и усилия соударения достигают величины, при которой происходит процесс деформации металла и его нанесения на поверхность в виде покрытия (рис.1.3, в).

Таким образом, теоретически, с учётом сделанных допущений, необходимо определить три диапазона критических амплитуд: A^I , A^{II} , A^{III} .

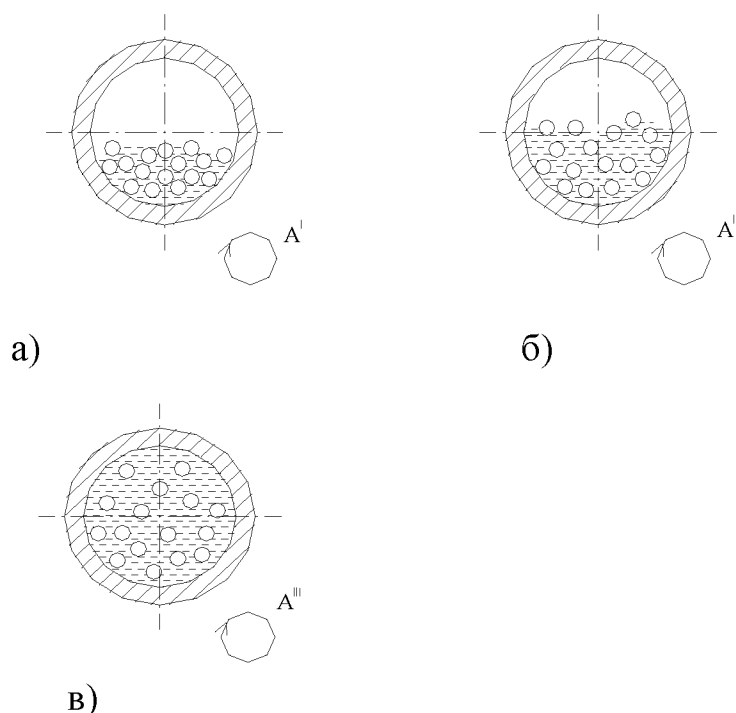


Рис.1.3. Диапазоны амплитудных критерий.

В итоге после анализа режимов обработки, вычисленных значений энергии, усилий, контактных напряжений [7] при МКМ можно выявить основные технологические стадии, распределённые по амплитудам:

1) Безотрывный режим колебания единой массы (ударные тела, изделия, наносимый материал) при амплитуде:

$$0 < A' \leq A_1 \quad (1)$$

где,

$$A_1 = \frac{g}{w^2 * \sin(w * t)} \quad (2)$$

при $w_1 = 157,079$ об/с и $\sin(w_1 * t) \approx 1$ получим:

$$A_1 = \frac{g}{w^2} = 0,0004\text{м} = 0,4 \text{ мм.}$$

2) Распушение массы, при амплитудах:

$$A_1 < A'' \leq A_2 \quad (3)$$

где,

$$E = E_{го} = \frac{M * A * w_1^2}{2} * \cos^2(w * t) \quad (4)$$

Из этого выражения находим A_2 :

$$A_2 = 0,0013\text{м} = 1,3\text{мм}$$

3) Технологическое воздействие при амплитудах:

$$A_2 < A''' \leq A_3 \quad (5)$$

где,

$$A_3 = 6 \text{ мм} \quad (\text{для частоты } w_1 \text{ и } w_2)$$

4) Верхний предел разрушения ударных тел при амплитудах:

$$A_3 < A^{IV} \quad (6)$$

Оптимальный же вариант значений амплитуд при частотах w_1 и w_2 находится в пределах:

$$2\text{мм} < A^{opt} \leq 3\text{мм} \quad (7)$$

Этот теоретический вывод согласуется с экспериментальными опытами по нанесению Рb-свинцового покрытия на шарики вакуумных подшипников во взаимосвязи с трибологическими характеристиками [8].

Литература:

1. Цеев Н. А., Козелкин В. В., Гуров А. А. Материалы для узлов сухого трения, работающих в вакууме. // Справочник /Под общ. Ред. Козелкина В. В. -М.: Машиностроение, 1991. -192с: ил.
2. Волчкевич Л. И. Волчкевич И. Л. Импульсно-динамическое нанесение тонкоплёночных покрытий. // Метроном, 1994. №5-6, с.35-37.

3. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 525 с.
4. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн. / Под общей редакцией И. В. Крагельского, -М.: Машиностроение., 1978, Кн.1, -400с.
5. Добронравов В. В., Никитин Н. Н. Курс теоретической механики. - М.: Высшая школа, 1983, -575с.
6. Политов И. В., Кузнецов Н. А. Вибрационная обработка деталей машин и приборов. -Л.: Лениздат, 1965.
7. Пинегин С.В. Контактная прочность в машинах. - М., 1965.
8. Solid lubricant mass contact transfer technology usage for vacuum ball bearings longevity increasing. В Arzymatov and E Deulin. Journal of Physics: Conference Series, Volume 729, 23rd International Conference on Vacuum Technique and Technology 7–9 June 2016, St. Petersburg, Russia Citation В Arzymatov and E Deulin 2016 *J. Phys.: Conf. Ser.* 729 012027 DOI 10.1088/1742-6596/729/1/012027