

DOI: <https://doi.org/10.69722/1694-8211-2025-62-227-233>

УДК: 621.793.79

Арзыматов Б. М., преподаватель

arzymatov_bolot@mail.ru

ORCID: 0009-0007-6557-6755

Бакытбеков Б. Б., студент

bayawb98@gmail.com

ORCID: 0009-0009-0064-3966

ИГУ им. К. Тыныстанова

г. Каракол, Кыргызстан

МОДЕЛИРОВАНИЕ НА MATLAB ПРОЦЕССА КОНТАКТНОГО МАССОПЕРЕНОСА ПОКРЫТИЙ НА ПОДШИПНИКАХ

Статья посвящена исследованию методов нанесения твёрдосмазочных покрытий на детали подшипников качения для работы в условиях вакуума. При разработке и эксплуатации оборудования, работающего в условиях высокого вакуума, необходимо принимать специальные меры, обеспечивающие безотказность и долговечность поверхностей трения в кинематических передачах: подшипников, зубчатых и фрикционных передач, направляющих качения и скольжения. Рассматриваются особенности вакуумной среды, такие как высокая активность поверхностей, отсутствие конвективного теплообмена и необходимость минимизации газовой выделений и износа. Описан метод контактного массопереноса, позволяющий наносить покрытия без использования сложного оборудования. Приведены результаты моделирования в MATLAB, демонстрирующие влияние массы и скорости шариков на усилия при нанесении покрытия. Выявлены оптимальные параметры процесса, обеспечивающие долговечность и эффективность работы подшипников в вакууме. Полученные данные могут быть использованы в машиностроении для разработки надёжных вакуумных механизмов.

Ключевые слова: вакуум, твёрдо смазочные покрытия, подшипники качения, метод контактного массопереноса, моделирование, MATLAB, долговечность.

Арзыматов Б. М., окутуучу

arzymatov_bolot@mail.ru

ORCID: 0009-0007-6557-6755

Бакытбеков Б. Б., студент

bayawb98@gmail.com

ORCID: 0009-0009-0064-3966

К. Тыныстанов ат. БМУ

Каракол ш., Кыргызстан

МAТLAB ПРOГРAММAСЫНДA ПOДШИПНИКTEPДИН КАПТООЛОРУНДАГЫ КОНТАКТТЫК МАССАЛЫК ӨТКӨРҮҮ ПРOЦЕССИН МОДЕЛДӨӨ

Макалa вакуум шарттарында иштөө үчүн подшипниктердин тетиктерине катуу майлоочу каптамаларды жабуу ыкмаларын изилдөөгө арналган. Жогорку вакуум шарттарында иштеген жабдууларды иштеп чыгууда жана эксплуатациялоодо кинематикалык берүүлөрдөгү сүрүлүү беттеринин ишенимдүүлүгүн жана узак мөөнөттүүлүгүн камсыз кылуу боюнча атайын чараларды көрүү зарыл: подшипниктер, тиштүү жана сүрүлүү берүүлөрү, жылма жана тайгалануу багыттары. Вакуум чөйрөсүнүн өзгөчөлүктөрү, мисалы, беттердин жогорку активдүүлүгү, конвективдүү жылуулук алмашуунун жоктугу жана газдын бөлүнүшүн жана эскирүүнү минималдаштыруу зарылчылыгы каралат. Каптамаларды татаал жабдууларды колдонбостон жабууга

мүмкүндүк берүүчү контактылык масса өткөрүү ыкмасы сүрөттөлөт. MATLABда моделдөө жыйынтыктары келтирилген, алар каптаманы жабуу учурунда тоголоктордун массасынын жана ылдамдыгынын күчкө тийгизген таасирин көрсөтөт. Вакуумда подшипниктердин узак мөөнөттүүлүгүн жана эффективдүү иштешин камсыз кылуучу процесстин оптималдуу параметрлери аныкталды. Алынган маалыматтар машина курууда ишенимдүү вакуум механизмдерин иштеп чыгууда колдонулушу мүмкүн.

Түйүндүү сөздөр: вакуум, катуу майлоочу каптамалар, подшипниктер, контактылык масса өткөрүү ыкмасы, моделдөө, MATLAB, узак мөөнөттүүлүк.

Arzymatov B. M., teacher

arzymatov_bolot@mail.ru

ORCID: 0009-0007-6557-6755

Bakytbekov B. B., student

bayawb98@gmail.com

ORCID: 0009-0009-0064-3966

K. Tynystanov Issyk-Kul state university
Karakol, Kyrgyzstan

MODELING OF THE CONTACT MASS TRANSFER PROCESS IN BEARING COATINGS USING MATLAB.

The article is devoted to the study of methods for applying solid lubricant coatings to rolling bearing parts for operation in vacuum conditions. When developing and operating equipment operating in high vacuum conditions, it is necessary to take special measures to ensure the reliability and durability of friction surfaces in kinematic transmissions: bearings, gear and friction transmissions, rolling and sliding guides. The features of the vacuum environment, such as the high activity of surfaces, the absence of convective heat transfer, and the need to minimize gas emission and wear, are considered. A contact mass transfer method is described that allows coatings to be applied without the use of complex equipment. The results of modeling in MATLAB are presented, demonstrating the effect of the mass and velocity of the balls on the forces during coating application. The optimal parameters of the process are revealed, ensuring the durability and efficiency of bearings in vacuum. The data obtained can be used in mechanical engineering for the development of reliable vacuum mechanisms.

Keywords: vacuum, solid lubricant coatings, rolling bearings, contact mass transfer method, modeling, MATLAB, durability.

Необходимость обеспечения работоспособности в вакууме технических устройств и приборов, содержащих узлы трения, существует в различных отраслях машиностроения. При разработке и эксплуатации оборудования, работающего в условиях высокого вакуума, необходимо принимать специальные меры, обеспечивающие безотказность и долговечность поверхностей трения в кинематических передачах: подшипников, зубчатых и фрикционных передач, направляющих качения и скольжения и др. Особые условия, в которых находятся механизмы вакуумного технологического оборудования, определяют специфические требования к материалам поверхностей пар трения. Среди неблагоприятных факторов вакуумной среды, влияющих на трибологические процессы, можно выделить главные:

а) высокая активность чистых поверхностей в вакууме, обусловленная восстановлением окисных плёнок и десорбцией газов;

б) неблагоприятные условия теплоотвода вследствие отсутствия конвективного теплообмена;

в) необходимость прогрева в сверхвысоком вакууме конструкций для обезгаживания, определяющая высокотемпературные условия работы пар трения;

г) воздействие потоков энергии большой мощности при проведении некоторых технологических процессов;

д) смена условий среды, окружающей пару трения, при разгерметизации вакуумных камер на атмосферу.

В вакууме происходит интенсивное испарение обычных жидких и консистентных смазок, сублимация твердых веществ, скорость этих процессов с увеличением температуры значительно возрастает. По этим причинам использование обычных материалов и смазок, применяемых в атмосфере, невозможно. Это и привело к поиску материалов, способных работать в сложных условиях вакуумной среды. Разрушение окисных плёнок увеличивает площадь поверхности чистого материала, обладающего более высокой энергией адгезионного взаимодействия и приводит к повышению коэффициента трения до значений более 0.4-0.9 [1]. Увеличение поверхностной энергии материалов в вакууме вследствие разрушения окисных плёнок, приводит не только к увеличению коэффициента трения в вакууме, но и к более интенсивному разрушению слоя материала.

Однако, проблема использования пар трения в вакууме связана не только со сложными условиями, в которых пары трения должны выполнять свои функции. Помимо традиционных фрикционных характеристик они должны обладать параметрами “экологической чистоты”, которые формулируют современные вакуумные технологии: минимумом газовой выделений при отсутствии в спектре нежелательных для технологических процессов компонентов и минимальным потоком генерируемых микрочастиц износа. Это приводит к необходимости исследования существующих и поиска новых материалов для пар трения, удовлетворяющих всей совокупности требований со стороны вакуумного технологического оборудования и, возможно, выбору оптимального решения проблемы. Можно назвать те основные характеристики, которым должны соответствовать пары трения, используемые в современном вакуумном технологическом оборудовании:

1. Традиционные фрикционные характеристики пар трения механизмов:

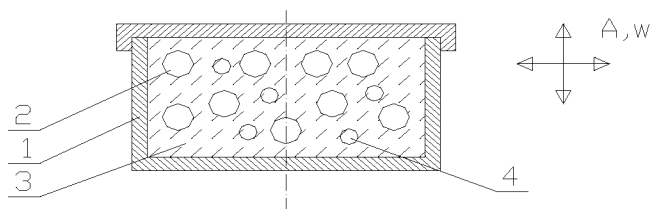
- а) низкий коэффициент трения;
- б) высокая нагрузочная способность;
- в) износостойкость- малая интенсивность изнашивания материалов пары трения или смазки;
- г) высокая химическая стойкость;
- д) незначительное изменение характеристик при повышенных температурах (высокая теплостойкость);
- е) малая толщина смазывающего слоя или изнашиваемого покрытия- для прецизионных пар трения;
- ж) соответствие коэффициентов температурного расширения смазывающего материала и материала основы, для пар трения с покрытиями.

2. Вакуумные характеристики:

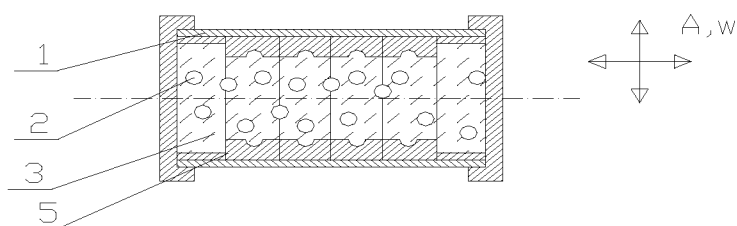
- а) низкий поток газовой выделений, отсутствие нежелательных элементов;
- б) низкая интенсивность генерации микродисперсных частиц;
- в) высокая теплопроводность смазывающего материала для исключения локального перегрева;
- г) малая величина “стоп-эффекта”- незначительная разница между коэффициентом трения покоя и коэффициентом трения скольжения после длительного простаивания механизмов, в том числе и после разгерметизации на атмосферу вакуумной камеры, что особенно важно для прецизионных механизмов.

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 [2]. Тонкие металлические покрытия (плёнки), нанесённые на трущиеся поверхности различными способами, могут являться эффективными смазками в условиях глубокого вакуума в широком диапазоне температур. 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. Металлические покрытия используют для обеспечения работоспособности в вакууме таких узлов, как подшипники скольжения, шарикоподшипники, пары с возвратно-поступательным движением, зубчатые колеса, различные направляющие и др. Металлические антифрикционные покрытия условно подразделяют на мягкие (например, из золота, серебра, олова, свинца, висмута, кадмия, индия, галлия, сплавов золота и серебра и других металлов с микротвёрдостью до 300 HV) и твёрдые (например, из никеля, никель- фосфора, кобальт- фосфора и других металлов в микротвёрдостью более 400 HV).

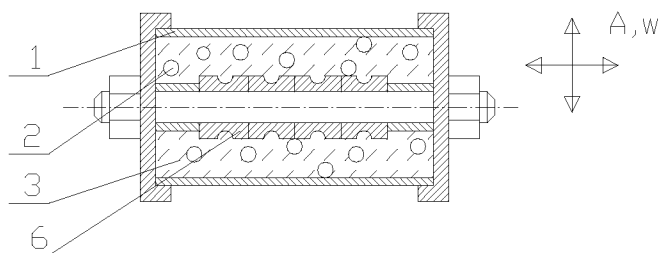
При методе контактного массопереноса (МКМ) покрытий сближение поверхностей, приведение их в тесный контакт и придание дополнительной энергии, необходимой для создания прочной адгезионной связи, обеспечивается высокоэнергетической механической активацией при соударении твёрдых тел [3]. Детали подшипников, 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 твёрдосмазочных покрытий (ТСП) на поверхности вакуумных 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 (см. Рисунок 1).



а) на шарики подшипников



б) на внешние кольца подшипников



в) на внутренние кольца подшипников

Рисунок 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.

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.

Основными задачами являются:

1. Физико-математическое моделирование контактных взаимодействий при нанесении твёрдосмазочных покрытий на подшипниках методом контактного массопереноса (МКМ);
2. Обоснование технологической схемы и выбора режимов МКМ твёрдосмазочных покрытий на детали подшипников качения, провести оптимизацию параметров нанесения покрытий на основе данных моделирования и экспериментальных исследований;
3. Доказательство работоспособности (безотказности и долговечности) подшипников качения с МКМ покрытиями, работающих в вакууме;

Полученные результаты могут быть использованы при разработке вакуумных механизмов в различных отраслях. Предложенные методы нанесения ТСП обеспечивают улучшение долговечности и эффективности работы узлов трения, что особенно важно для механизмов, работающих в вакууме [4]. Анализ результатов моделирования, представленных в MATLAB, показал высокую перспективность применения ТСП для вакуумных механизмов. Разработанные модели дают возможность прогнозировать поведение покрытий при различных режимах работы, что

делает их применение более точным и экономически обоснованным. Дополнительно моделирование подтвердило, что выбор оптимальных параметров нанесения покрытия может значительно улучшить эксплуатационные характеристики. Рассмотрим результаты моделирования в ПО MATLAB. В MATLAB код выполнил расчёт усилия P в зависимости от амплитуды и скорости для двух различных масс шариков ($M_1=0.002$ кг и $M_2=0.015$ кг), а затем визуализировал эти зависимости на графиках.

Исходные параметры системы

- диаметр контактной области $d = 0,28 \text{ мм} = 0,28 * 10^{-3} \text{ м}$.
- амплитуды $A_1=2 \text{ мм}$, $A_2=3 \text{ мм}$, $A_3=5 \text{ мм}$, $A_4=7 \text{ мм}$.
- массы ударного тела $M_T^1 = 2 * 10^{-3} \text{ кг}$ (для $d_T^1 = 8 \text{ мм}$), $M_T^2 = 15,4 * 10^{-3} \text{ кг}$ (для сферического шара $d_T^1 = 15,6 \text{ мм}$).
- модули упругости материалов и коэффициенты Пуассона: $E_M^{Pb} = 1,7 * 10^4 \text{ МПа}$, $E_T^{CT} = 2,6 * 10^5 \text{ МПа}$, $\nu_M^{Pb} = 0,43$, $\nu_T^{CT} = 0,23$
- скорости (м/с): $V = [0.31, 0.47, 0.78, 1.1] \text{ м/с}$.

Формула для расчёта усилия P .

Усилие рассчитывается по формуле [5]:

$$P = \sqrt{\frac{5}{6} * \frac{M_1 * V_1^2 * d}{\left(\frac{1 - \nu_M^2}{E_M} + \frac{1 - \nu_T^2}{E_T} \right)}} \quad (1)$$

Основной расчёт.

Усилия P_1 и P_2 вычисляются для всех скоростей V и двух масс M_1 и M_2 :

```
for i = 1:length(V)
    P1(i) = sqrt((5/6) * (M1 * V(i)^2 * d) / ...
        ((1 - nu_M_Pb^2) / E_M_Pb + (1 - nu_T_CT^2) / E_T_CT));
    P2(i) = sqrt((5/6) * (M2 * V(i)^2 * d) / ...
        ((1 - nu_M_Pb^2) / E_M_Pb + (1 - nu_T_CT^2) / E_T_CT));
end
```

Построение графиков.

Два графика отображают зависимости усилия P от амплитуды amp для каждой массы шарика (см. рисунок 2):

- Первый график: Усилие P_1 для массы $M_1=0.002$ кг.
- Второй график: Усилие P_2 для массы $M_2=0.015$ кг.

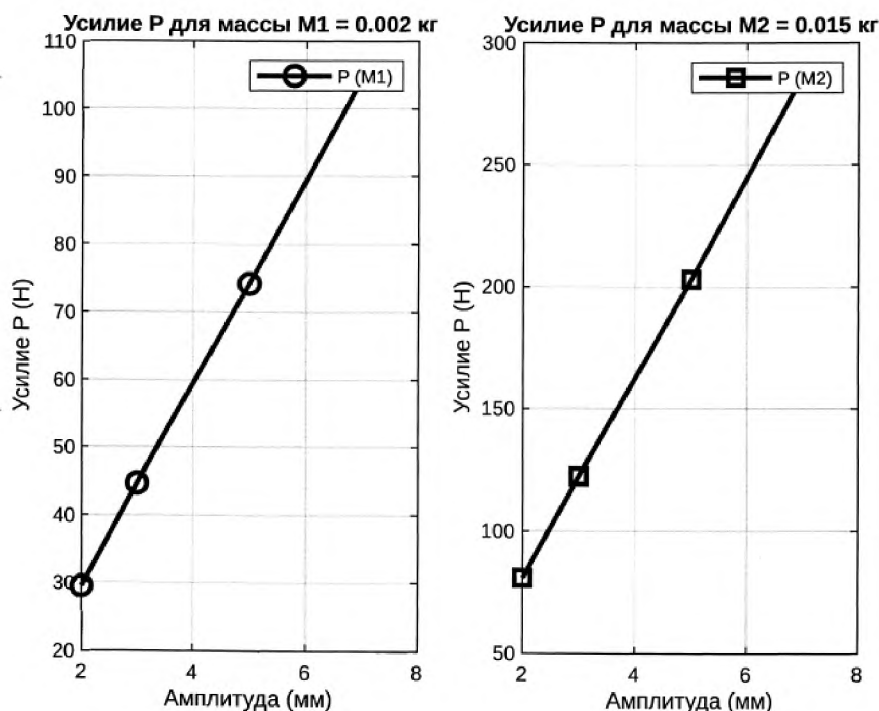


Рисунок 2. Расчёт усилий Р.

Выводы:

- Усилия Р1 и Р2 зависят от массы шарика (M1, M2) и скорости V. Чем больше масса и скорость, тем выше значение усилия.
- Графики позволяют визуально оценить, как изменяется усилие для разных амплитуд.

Литература:

1. Панфилов, Ю. В., Щаулин Э. М. Устройство контроля и анализа потоков микродисперсных частиц в объеме вакуумной камеры / Ю. В. Панфилов, Э. М. Щаулин // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: Тезисы докл. Междунар. науч. - техн. конф. -Гурзуф, 1994. -с. 230-231.
2. Цеев, Н. А., Козелкин, В. В., Гуров, А. А. Материалы для узлов сухого трения, работающих в вакууме / Н. А. Цеев, В.В. Козелкин, В. В. Гуров // Справочник /Под общ. ред. Козелкина В. В. -М.: Маш-е, 1991. -192с: ил.
3. Волчкевич, Л. И. Волчкевич, И. Л. Импульсно - динамическое нанесение тонкоплёночных покрытий / Л. И. Волкевич, И. Л. Волкевич // Метроном, 1994. №5-6, С.35-37.
4. Арзыматов, Б. М. Моделирование процесса контактного массопереноса покрытий на вакуумных подшипниках / Б. М. Арзыматов // Вестник Иссык-Кульского университета, 2023. - № 55. - С. 266-274.
5. Арзыматов, Б. М., Кабаева, Г. Дж. Исследование долговечности твёрдосмазочных покрытий на деталях вакуумных подшипников, нанесенных методом контактного массопереноса / Б. М. Арзыматов, Г. Дж. Кабаева // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. 2023. - № 3 (67). - С. 1541-1548.