

На правах рукописи
УДК 543.271

ГАЦЕНКО АЛЕКСАНДР АНДРЕЕВИЧ

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ
СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ОБОРУДОВАНИЯ ПОСРЕДСТВОМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
НАНОТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Специальность 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (машиностроение)»

05.02.04 – «Трение и износ в машинах»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва, 2003

127

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом
Университете им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
ДЕУЛИН Е.А.

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
КОВАЛЕВ Л.К.
кандидат технических наук
ПАПКО В.М.

Ведущая организация – НИИ ВТ им. С.А. Векшинского

Защита Гаценко А.А.	1600089	03 г. на заседании
диссертации Обеспечение		ском Государственным
Техническ технологической надежности		адресу: 105005, Москва, 2-я
Бауманская свехвысоковакуумного		
Телеф автоматизированного обор...		
2003	0-00	
Ваша м		на заверенный печатью,

1600089

У им

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

Васильев А.С.

каз № 25Т

им. Н.Э. Баумана

Актуальность проблемы. Современное вакуумное технологическое оборудование, оборудование для структурного, физического и химического анализа материалов, космическое и ядерное оборудование невозможно представить без вакуумного привода.

Последние достижения в технологии электронных приборов, такие как переход на 90-нанометровую технологию изготовления чипов, микросхем памяти и микропроцессоров, разработка нового типа электронно-оптических преобразователей, создание микроэлектромеханических систем (МЭМС), включающих микродвигатели, микронасосы, микроредукторы, размеры которых не превышают 500 мкм, стали возможны благодаря применению новейших видов сверхвысоковакуумного оборудования, осуществляющего процессы ионной имплантации, электронно-лучевой и рентгеновской литографии, ионного и плазмохимического травления, сборки ФЭП методом переноса и т.д. в едином технологическом цикле в вакууме. При этом на несколько порядков возросли требования к вакууму и его парциальному составу (предельное давление $P < 10^{-10}$ Па, рабочий вакуум $P_{\text{раб}} = 10^{-8} - 10^{-9}$ Па, отсутствие углеводородов).

Важнейшим требованием к параметрам указанного оборудования является не столько поддержания в нем сверхвысокого вакуума, сколько сохранение технологических поверхностей в ювильном (чистом, лишенным сорбированного газа) состоянии. В тоже время ювильная поверхность по своим свойствам резко отличается от просто очищенной (в традиционном понимании) поверхности. Как показывает опыт, ювильные поверхности при контактировании склонны к схватыванию, что резко снижает надежность механизмов, работающих в сверхвысоком вакууме.

При создании автоматизированных вакуумных линий остро встает проблема надежности механического оборудования, как один из факторов повышения эффективности его эксплуатации. Проблема устранения аварийных отказов механизмов является актуальной в сверхвысоковакуумном технологическом оборудовании, поскольку аварийные отказы ведут к длительным (до двух суток) простоям и к потере дорогостоящих полуфабрикатов.

Высокие значения коэффициента трения, нестабильность и непредсказуемость поведения коэффициента трения у механизмов, работающих в сверхвысоком вакууме, является одной из причин сдерживающих развитие автоматизированного сверхвысоковакуумного оборудования.

Таким образом, одной из основных проблем при создании и эксплуатации механизмов автоматизированного сверхвысоковакуумного оборудования остается прогнозирование поведения коэффициента трения фрикционных пар этих механизмов в условиях изменяющегося остаточного давления, температуры, состава остаточной среды.

Цель работы. Повышение надежности механизмов автоматизированного оборудования путем использования полученных теоретических и экспе-

риментальных результатов по изменению сил и коэффициентов трения покоя кремниевых поверхностей в условиях изменяющегося остаточного давления, температуры, состава остаточной среды.

Методы исследований. Теоретические исследования основаны на теории трения, теории надежности, теории производительности, теории точности, теории машин и механизмов, теории вероятности, теории пластичности.

Экспериментальные исследования проводились на специально изготовленных стендах в лаборатории кафедры «Электроника и вакуумная физика» Карлова Университета (Прага, Чехия). Обработка результатов экспериментов, оценка их точности и достоверности выполнялись на ЭВМ с применением теории вероятности, математической статистики, регрессионного анализа.

Научная новизна. Разработано новое средство для автоматизации вакуумного автоматизированного оборудования, использующего механизмы «сухого» трения – фрикционный вакуумметр.

Впервые теоретически рассчитаны зависимости коэффициента «сухого» трения от коэффициента покрытия, а также от параметров газовой среды: давления газов, температуры, парциального состава остаточных газов.

Впервые теоретически и экспериментально обоснован единый критерий для всех степеней вакуума - коэффициент покрытия поверхностей сорбатом.

Впервые откорректированы научные критерии понятия «степень вакуума».

Впервые получены статистические оценки коэффициента трения покоя при различных коэффициентах покрытия для различных давлений воздуха, азота, кислорода, паров воды, при различных температурах.

Впервые получены зависимости для оценки потока внезапных отказов фрикционных механизмов сухого трения, автоматизированного оборудования электронной техники.

Практическая ценность. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании механизмов, использующих фрикционные пары; для обоснованного выбора двигателей; расчета потока внезапных отказов; создаваемого автоматизированного оборудования. Экспериментально полученные зависимости могут быть использованы для калибровки фрикционного вакуумметра.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры МТ-11 “Электронные технологии в машиностроении” МГТУ им Н.Э. Баумана, на семинаре им. М.М. Хрущева Института Машиноведения РАН, на 4 - 9-й Международных научно-технических конференциях “Вакуумная наука и техника” (Гурзуф, Судак, 1997 - 2002), 14-м Международном вакуумном конгрессе (Бирмингем, Великобритания, 1998), 12-й Международной конференции «Wear of Materials» (Атланта, США), 13-й Международной конференции «Wear of Materials» (Ванкувер, Канада), 2-м Международном Трибологическом Конгрессе (Вена, Австрия, 2001), 9-й Объединенной Вакуумной Конференции (Грац, Австрия, 2002), Международном се-

минаре «Tribology and emission phenomena» (Прага, Чехия, 2002) и др., а также использовались при разработке двух экспериментальных сверхвысоковакуумных стендов в Карловом Университете и МГТУ им. Н.Э. Баумана, при разработке конструкции фрикционного вакуумметра, предназначенного для автоматизации сверхвысоковакуумного оборудования, при разработке методики расчета и регулирования потока внезапных отказов механизмов автоматизированного оборудования.

Публикации. Основное содержание работы отражено в 21 печатной работе.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, общих выводов по работе, библиографического списка использованной литературы. Содержит 155 страниц машинописного текста, 54 рисунка, 17 таблиц и библиографический список из 124 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, поставлена цель и сформулированы основные научные положения, которые выносятся на защиту.

В первой главе проведен анализ автоматизированного оборудования электронной техники, насыщенного механическими узлами. Сделан обзор механизмов оборудования электронной техники, использующих «сухое» трение. Сделан анализ существующих теорий трения.

Проблемам повышения надежности вакуумного привода и его влияния на надежность и производительность оборудования посвящены работы Г.А. Шаумяна, Ю.А. Хруничева, Л.И. Волчкевича, Е.А. Деулина, А.С. Проникова, А.Г. Блинова, Б.С. Данилина, С.А. Ашинова и др.

Связь между производительностью оборудования и надежностью привода заключается в зависимости технической Q_T и фактической Q_F производительности оборудования от таких показателей надежности привода, как среднее время наработки на отказ j -го узла T_j , параметр потока отказов λ_j и др. Существенное повышение надежности привода возможно либо за счет регулирования показателей $\bar{T}_j$, λ_j и др., либо за счет использования системы диагностики. Эффективное регулирование надежности оборудования основывается на раскрытии механизма формирования отказа, анализе факторов, влияющих на показатели надежности, и построении модели, отражающей взаимосвязь этих факторов с показателями надежности. Однако, для случая внезапных отказов теоретической методики расчета показателей надежности не существует, а имеющиеся методики основываются на статистической обработке экспериментальных данных, полученных для прототипов.

Проведен анализ известных работ И.В. Крагельского, Ю.Н. Дроздова, И.Г. Носовского, Б.В. Дерягина, Ф. Боудена и др. по исследованию «сухого» трения, который показывает, что рассмотренные работы базируются на разрозненных теоретических моделях при рассмотрении коэффициента трения

как функции давления, температуры, скорости, нагрузки; поскольку все указанные параметры реализуются на поверхности контакта, представляется целесообразным создание единой концептуальной модели сухого трения, использующего в качестве основного критерия какой-то параметр поверхности.

Показано влияние параметров трения (среднее значение коэффициента трения, дисперсии в совокупности с пусковым моментом двигателя) на формирование потока внезапных отказов приводов автоматизированного оборудования.

Показано, что изучение поведения коэффициента трения и его поведение позволяют прогнозировать и регулировать поток внезапных отказов механических узлов сухого трения автоматизированного оборудования еще на стадии проектирования.

Для достижения поставленной в работе цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) создать методику регулирования потока внезапных отказов, возникающих в нестабильном автоматизированном оборудовании из-за нестабильности силы трения;

- 2) разработать способы регулирования параметрической надежности автоматизированного оборудования, использующего механизмы «сухого» трения, в частности, разработать средство для автоматического измерения параметра «степень вакуума»;

- 3) исследовать зависимость коэффициента трения «сухого» от коэффициента покрытия контактирующих поверхностей сорбатом;

- 4) исследовать зависимости коэффициента «сухого» трения от давления остаточных газов;

- 5) исследовать зависимости коэффициента «сухого» трения от температуры;

- 6) исследовать зависимости коэффициента «сухого» трения от состава окружающей газовой среды;

Вторая глава посвящена разработке концепции «сухого» трения, в основу которой положена зависимость коэффициента трения от коэффициента покрытия и энергетических параметров контактирующих поверхностей и сорбата.

В вакууме поверхности покрыты большим количеством монослоев сорбированных и частично конденсированных газов. Это число монослоев Θ можно рассчитать, используя уравнения адсорбции. С этой целью были рассмотрены основные уравнения адсорбции: Генри, Фрейндлиха, Ленгмюра, БЭТ, Теории объемного заполнения микропор, Дубинина-Радушкевича-Каганера. Наиболее пригодной для расчетов коэффициента покрытия на контактирующих поверхностях является уравнение БЭТ.

Состав остаточных газов в вакуумной камере показал, что в камере присутствуют в большом количестве пары воды. Поэтому в дальнейших расчетах будет принято, что на контактирующие поверхности адсорбируется вода.

Расчет площади контакта определяется на основе реального профиля монокристаллического кремния, полученного на сканирующем туннельном микроскопе СММ-2000Т.

Суммарное количество монослоев сорбата Θ_{Σ} между контактирующими поверхностями может быть определено

$$\Theta_{\Sigma} = \Theta_1 + \Theta_2 \approx 2 \cdot \Theta, \quad (1)$$

где Θ_1 и Θ_2 – количество монослоев сорбата на первой и второй поверхности, соответственно.

Вода в первом монослое находится в твердом состоянии, поэтому первый монослой следует рассматривать как продолжение твердого тела и находящийся в квазитвердом состоянии. Тогда суммарная толщина δ сорбата будет равна:

$$\delta = (\Theta_{\Sigma} - 2) \cdot d_0, \quad (2)$$

где d_0 – диаметр молекулы

Рассмотрим изменение динамической силы трения постепенно в соответствии с уменьшением толщины суммарного покрытия контактирующих поверхностей (рисунок 1).

Вязкостная составляющая силы трения ($\Theta_{\Sigma} > 2$).

$$F_v = A \cdot P(X) \cdot P(Y) \cdot \mu(\delta) \frac{V}{\delta}, \quad (3)$$

где A – геометрическая площадь контакта; $P(X)$, $P(Y)$ – вероятность контактирования первой и второй поверхности вдоль осей X и Y соответственно; $\mu(\delta)$ – коэффициент динамической вязкости сорбата, зависящей от толщины сорбированного слоя; V – скорость скольжения.

Капиллярная составляющая силы трения ($\Theta_{\Sigma} > 2$). Капиллярная составляющая силы трения определяется нормальной и тангенциальной составляющими

$$F_{Cn} = l_{\Sigma} \cdot \sigma \cdot \sin(\varphi + \alpha), \quad (4)$$

$$F_{Ct} = \sigma \cdot \cos(\varphi + \alpha) \cdot l_{\Sigma} \cdot \int_{\psi=0}^{2\pi} \cos \psi \cdot d\psi, \quad (5)$$

где l_{Σ} – суммарная длина (береговая линия) границы микронеровности, рассчитанная на заданной глубине профиля для анализируемого профиля контактирующей поверхности; σ – поверхностное натяжение; φ – угол смачивания; α – угол наклона профиля микронеровности; ψ – угол между вектором силы F_C и вектором скорости скольжения V .

Суммарное значение коэффициента трения скольжения f_{cv} , рассчитанного в области капиллярно-вязкостного трения, может быть представлено:

$$f_{cv} = \frac{F_{Ct} + F_v}{N + F_{Cn}}, \quad (6)$$

где N – «внешняя» нормальная нагрузка при трении.

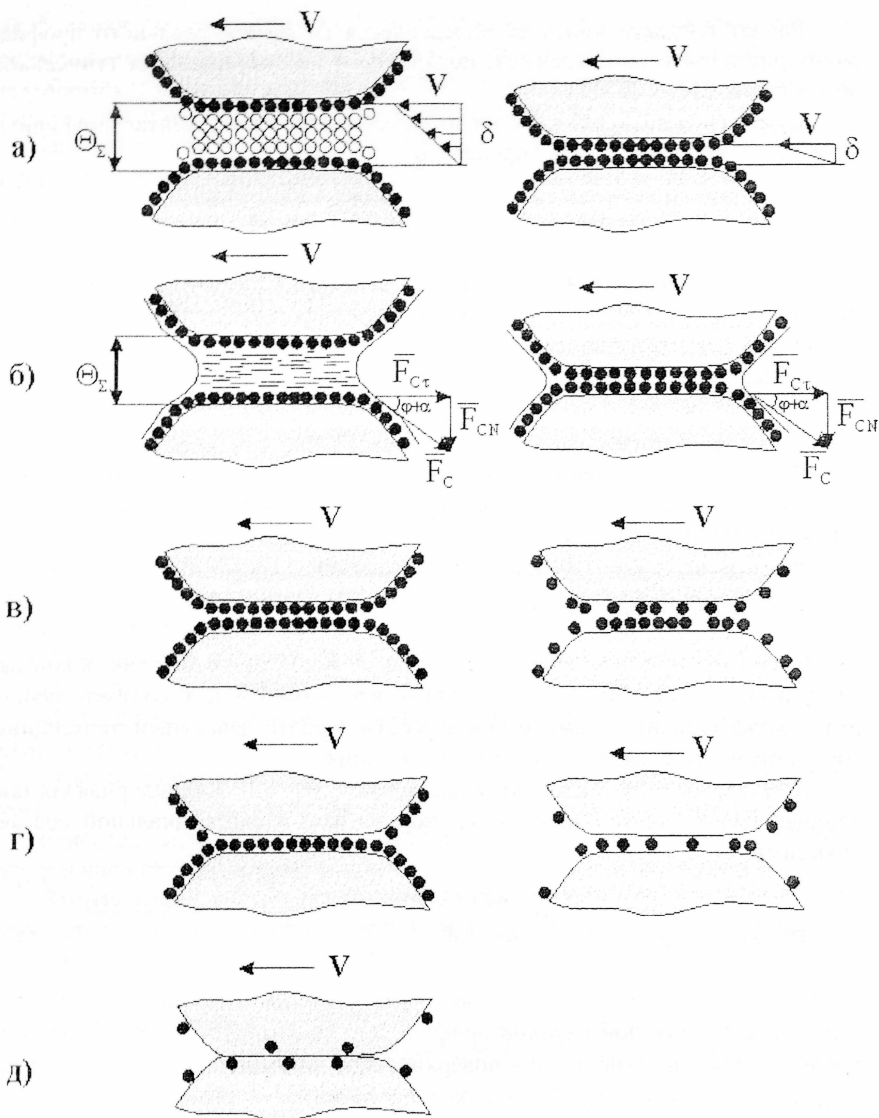


Рис. 1. Схема взаимодействия фрикционных поверхностей при различной суммарной толщине сорбата Θ_{Σ} : а) вязкостное трение ($\Theta_{\Sigma} > 2$); б) капиллярное трение ($\Theta_{\Sigma} > 2$); в) адгезионно-вязкостное трение ($2 \geq \Theta_{\Sigma} > 1$); г) адгезионное трение ($1 \geq \Theta_{\Sigma} > \Theta_{\Sigma CA}$); д) когезионное трение ($\Theta_{\Sigma CA} \geq \Theta_{\Sigma}$).

Адгезионно-вязкостное трение ($2 \geq \Theta_{\Sigma} > 1$). Доминирующими факторами в этой области являются адгезия и вязкость. Коэффициент трения и сила рассчитываются с помощью энергетической теории, согласно которой контактное взаимодействие сопровождается выделением тепловой энергии, которая равна суммарной энергии сорбции молекул газа, зажатых в зоне контакта:

$$f_{AV} = \frac{F_{AV}}{N} = \frac{(E'_L + E'_M) \cdot A_r \cdot P^4(X) \cdot (\Theta_{\Sigma} - 1)}{N \cdot L_X} \quad (7)$$

где E'_L – удельная сорбционная теплота парообразования; E'_M – удельная сорбционная энергия плавления; L_X – расстояние между поверхностями контакта.

При уменьшении Θ_{Σ} , при взаимном движении поверхностей до значения $\Theta_{\Sigma} = 1$ коэффициент трения достигает своего максимума при этом, работа трения начинает определяться энергией связи сорбата с подложкой. Это означает, что система целиком переходит к адгезионному трению.

Адгезионное трение ($1 \geq \Theta_{\Sigma} > \Theta_{\Sigma CA}$). Адгезионное трение существует в диапазоне остаточного давления, при котором верхний предел суммарного покрытия между перемещающимися поверхностями равен диаметру одной сорбированной молекулы ($\delta = d_0$), а нижний предел суммарного покрытия характеризует значение соответствующее механической имплантации сорбированных молекул в структуру материала твердого тела под действием нормальной силы N и определяется:

$$\Theta_{\Sigma CA} = \frac{N + F_{AN}}{\sigma_{B2} \cdot A \cdot P^4(X)}, \quad (8)$$

где σ_{B2} – предел прочности более слабого материала в рассматриваемой паре трения; F_{AN} – нормальная составляющая адгезионной силы трения.

В этом диапазоне работа трения определяется энергией связи сорбата с поверхностью монокристаллического кремния.

Коэффициент трения и сила трения в адгезионной области, используя энергетическую теорию, могут быть вычислены:

$$f_A = \frac{F_A}{N} = \frac{E'_A \cdot A \cdot P^4(X) \cdot \Theta_{\Sigma}}{N \cdot L_X}, \quad (9)$$

где E'_A – удельная адгезионная составляющая энергии связи «сорбат – твердое тело» для материалов пары трения и сорбированного газа.

После уменьшения Θ_{Σ} до критического значения $\Theta_{\Sigma CA}$ увеличение нормального давления на сорбированные молекулы приводит к разрушению кристаллической решетки контактирующего тела. Сорбированные молекулы газа «механически» вдавливаются (имплантируются) в кристаллическую решетку материала на участке поверхности Θ_{Σ}

Когезионное трение ($\Theta_{\Sigma CA} \geq \Theta_{\Sigma}$). При $\Theta_{\Sigma} < \Theta_{\Sigma CA}$ контактирующие поверхности вступают в «реальный» (когезионный) контакт при котором энергия связи, определяется когезионными силами.

Когезионная составляющая силы трения и коэффициент трения, рассчитанные по энергетической теории трения, могут быть выражены:

$$f_{CH} = \frac{F_{CH}}{N} = \frac{E_{CH} \cdot A \cdot P^4(X)}{N \cdot L_x} \quad (10)$$

где E_{CH} – удельная (когезионная) энергия связи между молекулами контактирующих поверхностей.

В разработанной модели, все существующие критерии «степени вакуума» заменяются одним критерием – коэффициентом покрытия. Определены границы существования различных степеней вакуума (рисунок 2):

- Низкий вакуум: $\Theta_{\Sigma} = 50 \dots 4$;
- Средний вакуум: $\Theta_{\Sigma} = 4 \dots 2$;
- Высокий вакуум: $\Theta_{\Sigma} = 2 \dots 1$;
- Сверхвысокий вакуум: $\Theta_{\Sigma} = 1 \dots \Theta_{\Sigma CA}$;
- Ультравысокий вакуум: $\Theta_{\Sigma} < \Theta_{\Sigma CA}$.

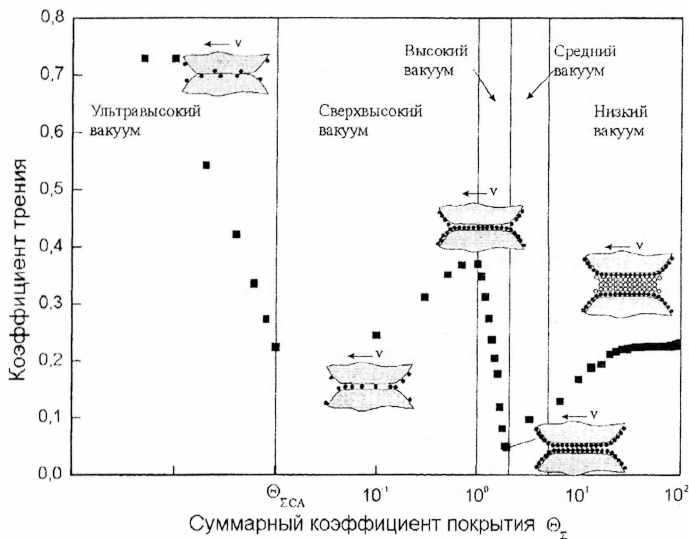


Рис. 2. Теоретическая модель изменения коэффициента «сухого» трения поверхностей монокристаллического кремния от суммарного коэффициента покрытия Θ_{Σ}

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию коэффициента трения покоя в зависимости от давления, температуры, состава остаточных газов, с целью проверки теоретических положений о зависимости ко-

эффекта трения от коэффициента покрытия и получения зависимостей, необходимых для правильного конструирования механизмов «сухого» трения для автоматизированного оборудования электронной техники.

Экспериментальные исследования производились с кремниевыми образцами, т.к. а) кремний занимает лидирующие позиции в области микромеханики; б) для кремния известны физические, механические и химические свойства; в) кремний является наиболее доступным материалом, для которого хорошо разработана технология обработки, позволяющая получать поверхности с минимальной шероховатостью, чтобы была возможность изучить физику молекулярного взаимодействия в наиболее «чистом» виде, с минимальными помехами от действия «механической» составляющей трения.

Эксперименты были проведены на специальных вакуумных стендах, позволяющих варьировать давление в диапазоне от 10^5 до 10^{-8} Па, температуру в диапазоне от 30 до 300 °С, снабженную системой напуска паров воды без замерзания, системой напуска газов (воздух, кислород, азот), системой контроля за составом остаточных газов в камере. Образцы были тщательно обработаны с целью удаления окисных пленок.

Эксперименты показали, что в диапазоне давлений воздуха от 10^5 до 10^{-5} Па коэффициент трения покоя монокристаллического кремния имеет сложную зависимость. При давлениях 10^5 , 8×10^{-1} и 10^{-5} Па коэффициент трения покоя достигает максимума, а при давлениях 5×10^3 и 2×10^{-3} Па – минимума (рисунок 3). Полученная зависимость подтвердила теоретически предсказанный характер изменения коэффициента от коэффициента покрытия.

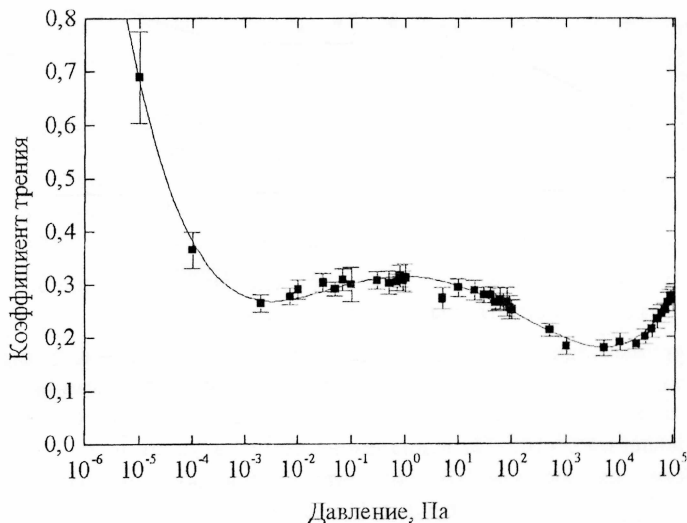


Рис. 3. Обобщенные результаты экспериментального исследования коэффициента трения покоя при различных остаточных давлениях воздуха.

В диапазоне давлений кислорода (чистота 99,999%) 10^4 – 10^5 Па коэффициент трения покоя убывал с 0,37 до 0,28 (при давлении 3×10^0 Па), затем возрастал до значения 0,4.

В диапазоне давлений азота (чистота 99,999%) 5×10^4 – 5×10^{-1} Па не происходило существенного изменения коэффициента трения покоя.

Серия из двух экспериментов с напуском паров воды проводилась в диапазоне рабочих давлений от 10^4 до 10^0 Па. При уменьшении давления с 10^4 до 10^0 Па коэффициент трения покоя уменьшается с 0,32 до 0,28 при первом эксперименте и с 0,39 до 0,25 при втором эксперименте (рисунок 4).

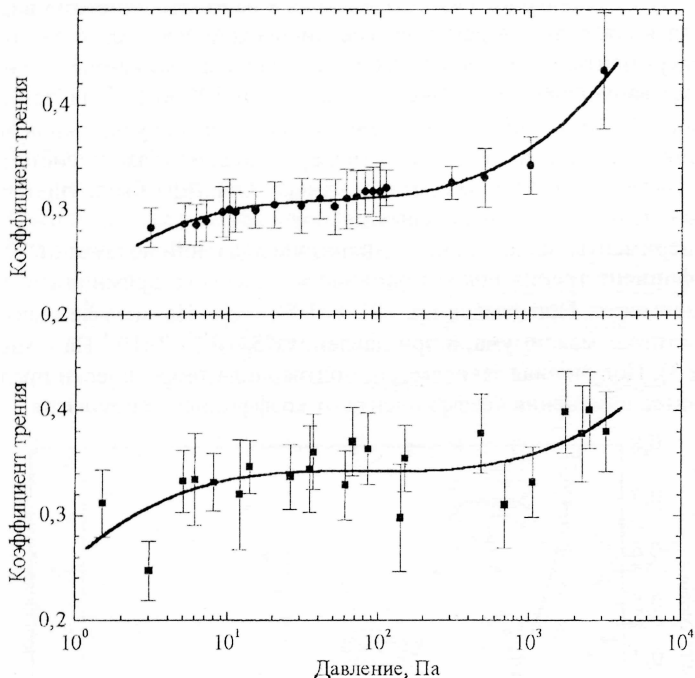


Рис. 4. Результаты экспериментального исследования коэффициента трения покоя при различных остаточных давлениях паров воды.

Полученные зависимости указывают на существенное влияние паров воды на коэффициент трения покоя монокристаллического кремния.

Была проведена серия экспериментов по измерению коэффициента трения при давлении 2×10^{-3} Па в диапазоне температур от плюс 30 до плюс 190 °С. Перед измерением коэффициента трения, образцы выдерживались при заданной температуре в течение 24 часов, после чего производились измерения (рисунок 5). При увеличении температуры от плюс 30 до плюс 130 °С коэффициент трения увеличивается с 0,75 до 0,88, что соответствует

изменению коэффициента покрытия от $\Theta_{\Sigma} = 2$ до $\Theta_{\Sigma} = 1$; при дальнейшем увеличении температуры до 190 °С и охлаждением до 32 °С коэффициент трения покоя убывает с 0,88 до 0,35, что соответствует изменению коэффициента покрытия от $\Theta_{\Sigma} = 1$ до $\Theta_{\Sigma} \rightarrow \Theta_{\Sigma \text{СА}}$.

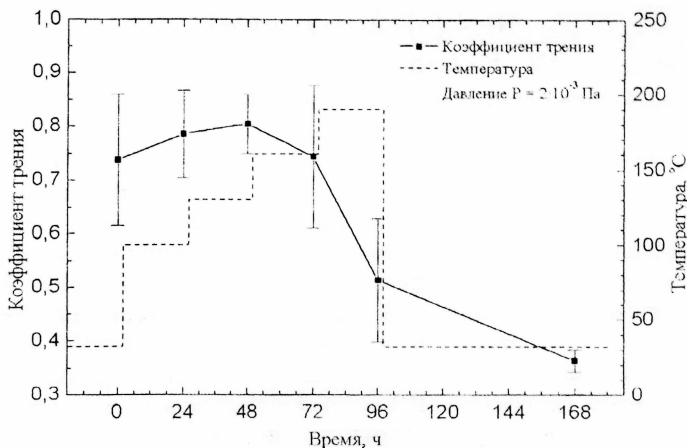


Рис. 5. Результаты экспериментального исследования коэффициента трения покоя в зависимости от температуры и времени экспозиции.

Исследования коэффициента трения, проведенные на различных вакуумных установках в диапазоне остаточных давлений от 10^5 до 10^{-8} Па, в диапазоне температур от 30 до 200 °С, в атмосфере азота, кислорода, паров воды, подтвердили теоретически предсказанный характер изменения коэффициента трения от коэффициента покрытия.

Четвертая глава посвящена методике расчета коэффициента трения при различных степенях покрытия, методике расчета показателей надежности по незапуску или заклиниванию механизмов вакуумного оборудования (параметр потока внезапных отказов, среднее время наработки на внезапный отказ), учитывающих полученные экспериментальные результаты, разработке прибора, позволяющего автоматически измерять параметр «степень вакуума».

Для точного определения коэффициента трения необходимо использовать откорректированную формулу, учитывающую влияние различных составляющих на коэффициент трения:

$$f = \operatorname{tg}(\alpha) + \frac{(F + F_v - F_{\text{Cт}}) \cdot \cos(\alpha) + (F_{\text{Cн}} - N) \cdot \sin(\alpha) + 2mg \cdot \sin(2\alpha)}{(N - F_{\text{Cн}} - mg \cdot \cos(\alpha)) \cdot \cos(\alpha)}, \quad (11)$$

где α — угол наклона оправки с образцами, при котором подвижный образец начинал скольжение; F_v — вязкостная составляющая силы трения, $F_{\text{Cт}}$, $F_{\text{Cн}}$ — тангенциальная и нормальная составляющие капиллярной силы трения, соот-

ответственно, m – масса образца, g – ускорение свободного падения, F – сила, приложенная к телу, N – нормальная нагрузка.

Для адгезионно-вязкостной, адгезионной и когезионной областей коэффициент трения определялся по формуле

$$f = \operatorname{tg}(\alpha) + \frac{(F_{\theta} - N) \cdot \sin(\alpha) + 2 \cdot m \cdot g \cdot \sin(2\alpha)}{(N - F - m \cdot g \cdot \cos(\alpha)) \cdot \cos(\alpha)}, \quad (12)$$

где F_{θ} – адгезионно-вязкостная, адгезионная или когезионная составляющая силы трения.

Выражение для определения потока внезапных отказов, включает с одной стороны несколько параметров оцениваемого механизма (среднее значение силы сопротивления, коэффициента трения, их дисперсии, как функции температуры, давления, наработки), а с другой стороны параметры используемого электродвигателя (среднее значение пускового момента двигателя, частота вращения), которые определяют вероятность отказа при пуске двигателя.

Поскольку перспективным направлением является создание микроэлектромеханических систем (МЭМС) на кремниевой основе, для которых именно силы трения формируют нагрузку на двигатель, представлена методика расчета потока внезапных отказов для кремниевого микроредуктора.

Вероятность внезапного отказа из-за случайного превышения суммарным моментом сопротивления на двигателе $\bar{M}_{\text{ВХ}}$ (зависящего от фрикционных параметров составляющих механизмов) допустимого момента $M_{\text{Д}}$ (пускового момента двигателя, предельного момента на входном валу и т.п.) может быть определена (для одного оборота или однократного запуска привода):

$$F_{\text{В}}(1) = 0,5 - \Phi \left[\frac{M_{\text{Д}} - \bar{M}_{\text{ВХ}}}{\sigma(M_{\text{ВХ}})} \right], \quad (13)$$

где Φ – функция Лапласа; $\sigma(M_{\text{ВХ}})$ – среднеквадратическое отклонение момента сопротивления на двигателе от математического ожидания.

Среднее время наработки на внезапный отказ:

$$\bar{T}_{\text{В}} = \frac{0,631 \cdot T_{\text{ц}}}{z \cdot K_z \cdot F_{\text{В}}(1)}. \quad (14)$$

Параметр потока отказов (интенсивность отказов в случае невозстановливаемых поломок привода):

$$\lambda_{\text{В}} = \frac{1}{\bar{T}_{\text{В}}} = \frac{F_{\text{В}}(1) \cdot z \cdot K_z}{0,631 \cdot T_{\text{ц}}}. \quad (15)$$

Зная вероятностные характеристики поведения коэффициента трения, мы получаем инструмент регулирования потока внезапных отказов путем регулирования мощности двигателя.

Коэффициент трения изменяется в результате изменения давления остаточных газов, температуры, времени нахождения фрикционной пары в данной среде, при этом основным параметром, определяющим коэффициент трения, является степень покрытия сорбатом. Как следует из физических основ вакуумной техники, именно этот параметр используется для определения степени вакуума, при переходе от высокого к сверхвысокому вакууму.

Наличие четкой и стабильной функциональной связи между коэффициентом покрытия (а также давлением остаточных газов) во всем диапазоне давлений, используемых в современной вакуумной технике позволяет использовать эту зависимость для измерения давления и степени вакуума. Последнее представляется более важным, поскольку именно степень вакуума определяет параметрическую надежность многих видов вакуумного оборудования (для выращивания монокристаллов, поверхностного анализа, молекулярной эпитаксии и т.д.).

Практическим внедрением результатов работы является фрикционный вакуумметр, позволяющий определять степень вакуума.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1) Анализ известных работ по исследованию сухого трения показывает, что при рассмотрении коэффициента трения как функции давления рассмотренные работы базируются на разрозненных теоретических моделях; представляется целесообразным создание единой концептуальной модели сухого трения, использующего в качестве основного критерия коэффициент покрытия контактирующих поверхностей сорбатом.

2) Показано, что весь диапазон суммарного коэффициента покрытия контактирующих поверхностей можно разделить на 4 поддиапазона, в которых поочередно в зависимости от степени вакуума, температуры, энергии сорбции доминируют разные физические явления: капиллярность, вязкость, адгезия, когезия.

3) Показано, что в разработанной модели, все существующие критерии «степени вакуума» заменяются одним критерием – коэффициентом покрытия; определены границы существования различных степеней вакуума; показано, что сохраняется старое определение «сверхвысокого вакуума»; показана необходимость введения нового понятия (новой степени вакуума) – «ультравысокого вакуума».

4) Показано, что области существования различных степеней вакуума занимают диапазоны:

- Низкий вакуум: $\Theta_{\Sigma} = 50 \dots 4$;
- Средний вакуум: $\Theta_{\Sigma} = 4 \dots 2$;
- Высокий вакуум: $\Theta_{\Sigma} = 2 \dots 1$;
- Сверхвысокий вакуум: $\Theta_{\Sigma} = 1 \dots \Theta_{\Sigma CA}$;
- Ультравысокий вакуум: $\Theta_{\Sigma} < \Theta_{\Sigma CA}$;

5) Показано, что для уточнения теоретической модели, особенно в диапазоне покрытий от $\Theta_{\Sigma} = 1$ до $\Theta_{\Sigma} = 2$, формируемых при давлениях $10^1 - 10^2$ Па, необходимо проведение экспериментальных исследований, уточняющих принятое распределение энергии связи «сорбат-твердое тело»; показано, что уравнение БЭТ дает существенную погрешность в определении коэффициента трения в диапазоне от $\Theta_{\Sigma} = 1$ до $\Theta_{\Sigma} = 2$, что объясняется, на наш взгляд, ступенчатым изменением энергии связи «сорбат-твердое тело» принятом в этом уравнении.

6) Результаты экспериментальных исследований коэффициента трения показали:

- в диапазоне давлений воздуха $10^5 - 10^8$ Па зависимость коэффициента трения кремниевых образцов от давления имеет 3 максимума и 2 минимума, соответствующих границам различных степеней вакуума;
- в диапазоне давлений кислорода $10^4 - 10^5$ Па, коэффициент трения проходит через минимум при давлении 10 Па;
- в диапазоне давлений азота $5 \times 10^4 - 5 \times 10^1$ Па не происходит существенного изменения коэффициента трения при изменении давления;
- в диапазоне давлений паров воды $3 \times 10^3 - 10^0$ Па коэффициент трения убывает с уменьшением давления, не доходя до минимального значения;
- при увеличении температуры от 30 до 130 °C коэффициент трения увеличивается с 0,75 до 0,88, что соответствует изменению коэффициента покрытия от $\Theta_{\Sigma} = 2$ до $\Theta_{\Sigma} = 1$; при дальнейшем увеличении температуры до 190 °C коэффициент трения убывает с 0,88 до 0,35, что соответствует изменению коэффициента покрытия от $\Theta_{\Sigma} = 1$ до $\Theta_{\Sigma} \rightarrow \Theta_{\Sigma SA}$.
- цикл обезгаживания контактирующих поверхностей ($T = 190$ °C, $P = 2 \times 10^{-3}$ Па, $t = 168$ часов) способствует уменьшению коэффициента трения кремниевых образцов с $f = 0,75$ (в начале) до $f = 0,35$ (в конце), что соответствует уменьшению коэффициента покрытия от $\Theta_{\Sigma} = 1$ до $\Theta_{\Sigma} \rightarrow \Theta_{\Sigma SA}$.

7) Результаты экспериментов подтверждают положение принятой концепции, что все изменения коэффициента трения при различных давлениях, температурах, влажности могут быть объяснены изменением количества сорбата между контактирующими поверхностями.

8) Экспериментально полученные статистические характеристики значений коэффициента трения позволяют производить вероятностную оценку поведения механизма, использующего пары сухого трения.

9) Анализ формул теории производительности позволяет связать показатели производительности оборудования $\eta_j(x_j)$, λ , ω , T_p , θ_a , θ_p с показателями надежности механизмов зависящими от трения.

10) Разработана методика расчета потока внезапных отказов, учитывающая полученные экспериментальные результаты.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В
СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Механика и физика точных вакуумных механизмов: Моногр.; В 2 т. / А.Т. Александрова, Н.С. Вагин, Н.В. Василенко и др.; Под ред. Е.А. Деулина. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-т, 2001 – Т.1. – 176 с.
2. –
3. Гаценко А.А., Репа П., Деулин Е.А. Исследование сухого трения монокристаллического кремния при различных степенях вакуума // Трение, износ, смазка (электронный ресурс). – 2002. – №15. – 4 с.
4. Гаценко А.А. Исследование зависимости коэффициента трения идеально плоских поверхностей от степени вакуума // Вакуумная наука и техника: материалы 4-й научно-технической конференции. - Гурзуф, 1997. - С. 136.
5. Деулин Е.А., Гаценко А.А. Исследование силы сухого трения гладких поверхностей SiO_2 - SiO_2 в зависимости от степени вакуума // Вакуумная наука и техника: материалы 5-й научно-технической конференции - Гурзуф, 1998. - С. 42-43.
6. Деулин Е.А. Гаценко А.А. Микитюк Э.А. Энергетический подход к расчёту силы трения в сверхвысоком вакууме // Вакуумная наука и техника: материалы 6-й научно-технической конференции. - Гурзуф, 1999. - С. 78-82.
7. Деулин Е.А. Гаценко А.А. Микитюк Э.А. Расчет сил трения гладких поверхностей в низком вакууме. // Вакуумная наука и техника: материалы 7-й научно-технической конференции. - Судак, 2000. - С. 161-165.
8. Гаценко А.А., Гладышев И.В., Деулин Е.А. Влияние температуры и давления на коэффициент сухого трения гладких поверхностей SiO_2 - SiO_2 // Вакуумная наука и техника: материалы 8-й научно-технической конференции. - Судак, 2001. - С. 130-135.
9. Деулин Е.А., Гаценко А.А., Репа П. Влияние остаточного давления различных газов на коэффициент трения в вакууме // Вакуумная наука и техника: материалы 9-й научно-технической конференции. - Судак, 2002. - С.167-170.
10. Deulin E.A., Gatsenko A.A., Loginov B.A. Friction of smooth surfaces of SiO_2 - SiO_2 as a function of residual pressure // Abstract Book of 14th International Vacuum Congress. – Birmingham (UK), 1998. - P. 310.
11. Deulin E.A., Gatsenko A.A. Variation of friction forces as a function of residual pressure // Delegate Manual of 12th International Conference on Wear of Materials. – Atlanta (USA), 1999. - P. 56.

12. Deulin E.A., Gatsenko A.A., Loginov B.A. Friction of smooth surfaces of SiO₂ - SiO₂ as a function of residual pressure // Surface Science. - 1999. - N 433-435. - P. 288-292.
13. Deulin E.A., Gatsenko A.A. Friction of smooth surfaces of SiO₂ - SiO₂ in vacuum // Europhysics Conference Abstracts of 18th European Conference on Surface Science. - Vienna (Austria), 1999. - P. 30.
14. Deulin E.A., Gatsenko A.A. Friction force as a function of residual pressure in vacuum // 9th Nordic Symposium on Tribology. - Parvoo (Finland), 2000. - V.3. - p. 849-854.
15. Deulin E.A., Gatsenko A.A. Friction forces of smooth surfaces as a function of ultra high vacuum variation // Synopses of International Tribology Conference. - Nagasaki (Japan), 2000. - P. 255.
16. Gatsenko A.A., Deulin E.A., Mikitik E.A. Physical foundation of dry friction and wear of SiO₂ - SiO₂ surfaces // Delegate Manual of 13th International Conference on Wear of Materials. - Vancouver (Canada), 2001. - P. 56.
17. Deulin E.A., Gatsenko A.A. Mikitik E.A. Friction force as a function of surface coverage variation // Abstract of papers of 2nd World Tribology Congress. - Vienna (Austria), 2001. - P.36.
18. Gatsenko A.A., Deulin E.A. Friction of smooth surfaces in widerange of vacuum // Book of Abstract of 9th European Conference on Applications of Surface and Interface Analysis. - Avignon (France), 2001. - P. 406.
19. Deulin E.A., Repa P., Gatsenko A.A. Friction coefficient variation on smooth surfaces over wide range of vacuum // Abstract Book of 15th International Vacuum Congress. - San-Francisco (USA), 2001. - P.216.
20. Deulin E.A., Gatsenko A.A. Sorbed gases as a lubrication at dry friction // 13th International Colloquium Tribology. - Stuttgart (Germany), 2002. - V.2. - p.1269-1276.
21. Gatsenko A.A., Repa P., Deulin E.A. Friction coefficient variation of smooth surfaces in vacuum // Abstract Book of 9th Joint Vacuum Conference. - Schloss Seggau by Graz (Austria), 2002. - P.20.