

На правах рукописи

УДК 621.004.6

КОНОВАЛОВ ВЛАДИМИР ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОРБАТА ОСТАТОЧНЫХ ГАЗОВ
НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ ВАКУУМНОГО
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Специальность: 05.27.06 – Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва, 2007

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Деулин Евгений Алексеевич

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
Буяновский Илья Александрович

доктор физико-математических наук,
профессор Зайцев Александр Иванович

Ведущая организация – ОАО «НПО Геофизика НВ»

Защита состоится « 29 » мая 2007 г. на заседании
диссертационного совета Д.212.141.18 в Московском государственном
техническом университете им. Н.Э.Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я
Бауманская ул., д.5

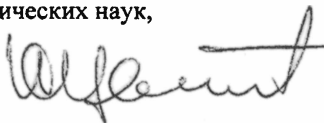
Телефон для справок: (495) 267-0963

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью,
просим направить по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ
им.Н.Э.Баумана

Автореферат разослан « 26 » апреля 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
доцент



Цветков Юрий Борисович

авт. кон

1118



1783609

Коновалов В. В. Исследования проблемы

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Фул

С развитием вакуумных технологий происходит все большая концентрация технологических операций в единой вакуумной технологической линии, что влечет за собой увеличение числа различных механизмов, служащих для перемещения, позиционирования изделий, а также выполнения технологических операций. Эти механизмы должны работать в вакууме и при этом должны иметь низкий износ и не нарушать весьма жесткие требования к чистоте технологической среды, как по общему давлению, так и по парциальным давлениям различных активных газов, особенно углеводородов, оксидов углерода и паров воды. Так в установках молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) число кинематических пар достигает нескольких десятков, а требуемое предельное остаточное давление составляет $p_{ост} = 5 \cdot 10^{-9}$ Па, допустимое рабочее давление $p_{доп} = 6.6 \cdot 10^{-8}$ Па и парциальные давления активных газов: $H_2 - 3 \cdot 10^{-8}$ Па; $H_2O - 2.6 \cdot 10^{-10}$ Па; $CO - 1.3 \cdot 10^{-10}$ Па; $N_2 - 2 \cdot 10^{-8}$ Па; $CO_2 - 1.3 \cdot 10^{-10}$ Па.

Состав остаточных газов в сверхвысоком вакууме в значительной мере состоит из водорода, а в высоком вакууме – из водорода и паров воды, взаимодействие которых с материалами вакуумных технологических систем может приводить к ряду негативных явлений, таких как водородный износ, образование углеводородов, гидридов и т.п., которые приводят к ухудшению качества остаточной среды, способствуют снижению работоспособности оборудования и увеличению издержек производства, связанных с заменой изношенных узлов.

Процессы взаимодействия остаточных газов с поверхностями при трении и изнашивании пар трения механизмов, работающих в вакууме, рассматривались в работах Александровой А.Т., Папко В.М., Деулина Е.А., Кужмана А.Г. и других исследователей. Режимы обезгаживания стенок вакуумных камер и внутрикамерной оснастки представлены табличными значениями в справочниках по вакуумной технике. Однако, существенное влияние на фрикционные характеристики пар трения и процессы газовой выделения в вакууме оказывают сорбированные на поверхности остаточные газы и особенно газы, содержащие водород. В известных научных работах эти аспекты работоспособности элементов вакуумного технологического оборудования изучены недостаточно.

Поэтому, целью работы является повышение работоспособности пар трения и уточнение режимов обезгаживания элементов вакуумного технологического оборудования путем изучения влияния на эти процессы сорбции остаточных газов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- уточнить источники, определяющие газообмен при трении в вакууме и обезгаживании элементов вакуумного технологического оборудования;
- разработать модель, связывающую наводораживание металлических элементов вакуумного оборудования с физическими характеристиками материалов и условиями процесса трения в вакууме;
- разработать методику экспериментальных исследований для определения параметров наводораживания металлов при трении и при выдержке в водородосодержащей остаточной атмосфере или во влажной среде;
- разработать стенд и провести экспериментальные исследования процессов газообмена при трении и обезгаживании поверхностей в вакууме;
- разработать методику расчета газовых потоков в кинематических парах и на свободных поверхностях элементов вакуумных систем с учетом влияния сорбата остаточных газов.

Методы исследований.

Теоретические исследования проводились на основе теории теплопроводности, теории адсорбции, теории диффузии в металлах, базировались на основных положениях тепло- массопереноса. Экспериментальные исследования включали методы вторично-ионной масс-спектропии (ВИМС) и ОЖЕ-анализа для исследования химического состава поверхности и распределения элементов по глубине до 10 мкм. Для создания методик расчета процессов наводораживания применялись методы физико-математического моделирования процессов тепло- и массообмена в приповерхностных слоях фрикционных пар.

В ходе исследований применялись компьютерные методы – регистрация измеряемых параметров с использованием быстродействующих аналого-цифровых преобразователей (АЦП), расчеты моделей процессов тепло- и газообмена с использованием современных компьютерных программных пакетов для символьных вычислений, использование современной цифровой фототех-

ники для регистрации процесса фрикционного взаимодействия в ходе экспериментальных исследований.

Научная новизна

1. Впервые показано, что на работоспособность механизмов, работающих в вакууме, существенное влияние оказывает «наводораживание» материалов кинематических пар, а главным источником растворенного водорода и его изотопов являются адсорбированные слои молекул, в основном воды, на поверхностях пар трения.

2. Выявлена взаимосвязь процессов диффузии составляющих сорбата остаточных газов с концентрацией растворенного в приповерхностных слоях водорода для зоны свободной поверхности и зоны контакта для пар трения.

3. Разработана математическая модель изменения во времени потока газовой выделения при прогреве элементов вакуумных систем, необходимая для уточнения режимов обезгаживания стенок вакуумной камеры и внутрикамерной арматуры.

Практическая ценность

Разработана оригинальная методика исследования процессов газообмена в парах трения механизмов, работающих в вакууме, основанная на искусственном наводораживании материалов кинематических элементов.

Разработана методика выбора режимов обезгаживания элементов вакуумных систем, учитывающая влияние сорбата остаточных газов и позволяющая дополнить имеющиеся справочные данные по газовой выделению прогреваемых вакуумных материалов.

Создан компактный вакуумный трибометр оригинальной конструкции, позволяющий проводить исследования вакуумных и фрикционных характеристик материалов в условиях сверхвысокого вакуума.

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры МТ-11 «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э.Баумана, на 5-й и Международной конференции «Вакуумная наука и техника» (Гурзуф, 1998), Международной трибологической конференции «ITC-2000» (г.Нагасаки, Япония), 9 – м Симпозиуме по трибологии «NORDTRIB-2000» (г.Порвоо, Финляндия), Объединенной вакуумной конференции «JVC-8», Конференции

«Ярофри-2000» (г.Ярославль, 2000), Конференции «SIMS Europe – 2000» (г.Мюнстер, Германия), 2-м Международном Трибологическом Конгрессе «WTC-2001» (г.Вена, Австрия), 7-й Европейской вакуумной конференции «EVC-7» (г.Мадрид, Испания), Объединенном Русско-Японском семинаре по нанотехнологии «Future trends in tribology 2002» (г.Москва), 16-м Международном вакуумном конгрессе «IVC-16» (г.Венеция, Италия, 2004) и др.

Разработанный в рамках данной работы вакуумный трибометр использовался при проведении экспериментальных исследований в соответствии с Соглашением № 724-2066434/2001-05 от 14.09.2001 между CSIC, г. Мадрид, Испания и МГТУ им. Н.Э. Баумана. Получен акт о внедрении.

Публикации. Основное содержание работы отражено в 11 печатных работах.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, общих выводов по работе, библиографического списка использованной литературы из 81 наименования и изложена на 135 страницах машинописного текста, включает в себя 49 рисунков и 14 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, определена цель и поставлены задачи работы, сформулирована научная новизна и основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен анализ влияния процессов газообмена на работоспособность вакуумного технологического оборудования. Показано, что отличительной особенностью вакуумного и особенно сверхвысоковакуумного технологического оборудования, является фактор, связывающий производительность такого оборудования с процессами газовыделения и газопоглощения газов поверхностями или процессами газообмена. Процессы взаимодействия «газ-поверхность» проявляются в вакуумном оборудовании не только как процессы «газовыделения» в рабочий вакууммированный объем, но и как процессы «газопоглощения» поверхностями оборудования. Анализ исследований Полякова, Гаркунова и др. показывает, что насыщение приповерхностных слоев металлов водородом является причиной так называемого «водородного износа» пар трения. Для вакуумного и сверхвысоковакуумного оборудования, процессы

насыщения приповерхностных слоев водородом могут являться еще и причиной отказов оборудования по критерию превышения допустимого давления в рабочем цикле, особенно при износе поверхностного слоя пар трения и, вследствие этого, всплеске газовыделения. В результате реакции с окислами водород образует пары воды, а с углеродом – углеводороды. Образующиеся при разрушении поверхностного слоя мелкодисперсные частицы износа и продукты химических реакций загрязняют технологическую вакуумную среду, что повышает привносимую дефектность готовых изделий электронной техники и уменьшает выход годных изделий.

Выполненный анализ различных групп вакуумного технологического оборудования показал, что современное вакуумное технологическое оборудование насыщено внутривакуумными механизмами и имеет тенденции к снижению рабочих давлений, ужесточению требований к составу рабочей среды и это приводит к увеличению влияния процессов взаимодействия «газ-поверхность» на работоспособность такого оборудования. Анализ показал, что ощутимее всего влияние процессов газообмена проявляется в сверхвысоковакуумном оборудовании, таком как оборудование для изготовления фотоэлектронных приборов, молекулярно-лучевой эпитаксии и др., насыщенном большим количеством вакуумных механизмов.

Показано, что в некоторых типах сверхвысоковакуумного технологического оборудования потоки газовыделения из кинематических пар составляют до 80% суммарного газового потока и почти полностью определяют достижимое в вакуумной системе давление.

Во второй главе выполнено теоретическое исследование процессов газообмена на поверхностях вакуумного оборудования. Определено, что наиболее актуальным для вакуумного оборудования, является процесс взаимодействия водорода и его изотопов с поверхностями коррозионно-стойких сталей аустенитного класса, являющимися конструкционными материалами, наиболее широко применяемыми в современном вакуумном оборудовании.

Проанализированы источники водорода и факторы, влияющие на наводороживание. Показано, что наводороживание металлов происходит как при их производстве, так и при термической обработке, а также и в процессе эксплуатации. Отмечено, что наводороживаемость выше в металлах с деформирован-

ной кристаллической решеткой, но самая высокая – в процессе деформации. Показано, что для снижения наводороживаемости необходимо уменьшать возможность активированной адсорбции водорода на поверхностях металлов в вакуумном оборудовании;

Проведен анализ физико-химических основ процессов взаимодействия газов с поверхностями вакуумного технологического оборудования. Показано, что при моделировании процессов газообмена, расчеты концентраций атомов водорода и его изотопов на поверхностях сталей рекомендуется проводить с использованием уравнений, описывающих мономолекулярную адсорбцию, так как именно первый монослой сорбата является определяющим в процессах взаимодействия «газ-поверхность».

Для описания процесса взаимодействия молекул воды и водорода с поверхностью металла создана обобщенная теоретическая модель, на которой представлены все возможные этапы взаимодействия (рис.1).

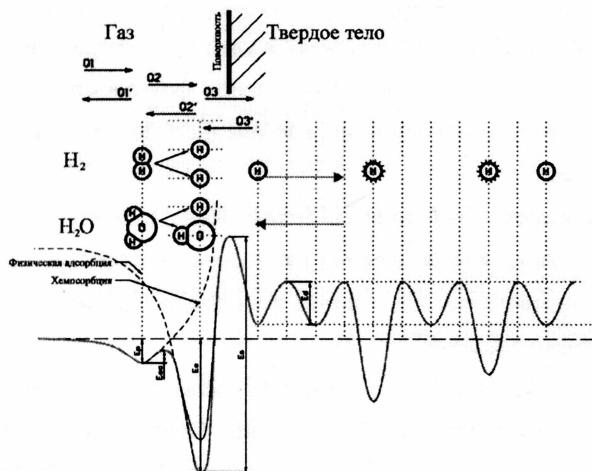


Рис.1. Обобщенная модель газообмена в системе газ-металл

При создании теоретической модели процессов взаимодействия в системе «газ-металл» необходимо решить несколько задач – определить исходные условия для диффузионных процессов (решить температурную задачу для зоны трения и определить коэффициент покрытия поверхности) и решить диффузионную задачу с заданными исходными условиями.

В модели используются следующие обозначения: $Q1 = k1 \cdot P_{H_2O}$ - молеку-

лярный поток, попадающий на поверхность, (поток физической адсорбции молекул (P_{H_2O} - парциальное давление воды в окружающей атмосфере); $Q1' = k1' \cdot \theta_p$ - молекулярный поток десорбции, где θ_p - безразмерная концентрация или коэффициент заполнения поверхности физически-адсорбированными молекулами; $Q2 = k2(1 - \theta_c) \theta_p$ - поток диссоциации и хемосорбции; $Q2' = k2' \theta_c$ - поток ассоциации и перехода в состояние физической сорбции, где θ_c - безразмерная концентрация или коэффициент заполнения химически адсорбированного мономолекулярного слоя; $Q3 = k3 \cdot \theta_c (1 - \theta_s)$ - поток растворяющихся в металле атомов водорода; $Q3' = k3' (1 - \theta_c) \cdot \theta_s$ - обратный поток перехода из металла на поверхность, где θ_s - безразмерная концентрация растворенного водорода в приповерхностном слое металла.

Температура в любой точке образца при трении в вакууме может быть определена с использованием уравнения теплопроводности (Карслоу, Егер):

$$T(x, z, t) = T_0 + 2 \cdot \frac{q_0(x) \cdot \alpha^{\frac{1}{2}}}{k} \cdot \left(t^{\frac{1}{2}} \cdot \text{ierfc} \left(\frac{z}{2 \cdot \sqrt{\alpha \cdot t}} \right) \right), \quad (1)$$

где x - положение на пятне контакта по направлению скольжения ($0 \leq x \leq x_{\max}$, где $x_{\max}$ - радиус пятна контакта), м; z - глубина точки под пятном контакта, м; t - момент времени от начала контактирования, с; T_0 - начальная температура образца, К; $q_0(x)$ - удельный поток тепла в точке x при трении, Вт/м²; α - коэффициент температуропроводности материала образца, м²/с; k - коэффициент теплопроводности материала образца, Вт/(м·К).

В приближенном расчете по «макромеханической» модели плотность потока тепла $q_0(x)$ определяется по формуле:

$$q_0(x) = f \cdot V \cdot \sigma_{\max}(x), \quad (2)$$

где f - коэффициент трения для исследуемых материалов; V - скорость трения скольжения, м/с; $\sigma_{\max}(x)$ - контактное напряжение в точке x , Н/м².

Для моделирования газообмена на свободной поверхности в качестве типовой предлагается использовать модель диффузии при постоянной температуре из источника с постоянной концентрацией в полубесконечный образец. Вы-

ражение для концентрации в этом случае:

$$C = C_0 \cdot \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}, \quad (3)$$

где $D = D_0 \cdot \exp \frac{-E_d}{R \cdot T}$ - коэффициент диффузии; D_0 - константа диффузии, м²/с; E_d - энергия активации диффузии, Дж/моль; $R = 8,314$ Дж/моль·К – универсальная газовая постоянная; C_0 - концентрация атомов диффундирующей примеси на поверхности, м⁻³; x - расстояние от поверхности вглубь образца, м; t - время, с.

Для решения необходимо корректно выбрать значения физических констант, определяющих процесс диффузии. Адекватность выбора можно определить по соответствию расчетной картины диффузии картине, полученной в результате экспериментальных исследований.

В зоне трения небольшое количество сорбата оказывается локализованным и «зажатым» между трущимися телами. В этом случае в качестве расчетной модели предлагается принимать модель диффузии в полубесконечный образец из слоя конечной толщины $2l_b$ с некоторой начальной концентрацией C_0 . В этом случае концентрация в образце будет определяться выражением:

$$c = \frac{C_0}{2} \left(\operatorname{erf} \frac{x + l_b}{2\sqrt{D \cdot t}} - \operatorname{erf} \frac{x - l_b}{2\sqrt{D \cdot t}} \right), \quad (4)$$

а начальное распределение концентрации определяется условием:

$$c = \begin{cases} C_0, & \text{при } (-l_b < x < l_b) \\ 0, & \text{при } (x < -l_b; x > l_b) \end{cases}.$$

При моделировании диффузионного процесса в зоне фрикционного взаимодействия сложной задачей является необходимость учета изменяющейся в процессе трения температуры.

В данной работе предлагается расчет диффузии при трении свести к расчету при постоянной температуре. Для этого предложено ввести понятие «эквивалентного» времени цикла, результат диффузии за которое будет идентичен суммарной диффузии за цикл трения. То есть соблюдаться условие:

$$D \cdot \Delta t_{\text{экв}} = D_1 \cdot \Delta t_1, \quad (5)$$

где D_1 – значение коэффициента диффузии в малый промежуток времени Δt_1 , в течение которого температуру можно считать постоянной.

$$\Delta t_{\text{экв}} = \exp\left(\frac{E}{R} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1}\right)\right) \cdot \Delta t_1. \quad (6)$$

Ввиду того, что температура в приповерхностной зоне образца изменяется в течение акта фрикционного взаимодействия, эквивалентное время необходимо определять интегрированием формулы (6), подставляя вместо T_1 функцию температуры в течение цикла контактирования (формула (1)). То есть:

$$t_{\text{экв}} = \int_0^{T_c} \exp\left(\frac{E}{R} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1(t)}\right)\right) \cdot dt, \quad (7)$$

где T_c – время цикла контактирования.

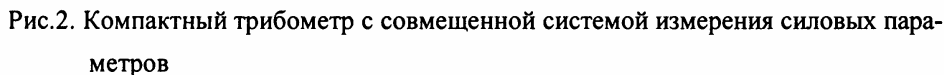
После определения «эквивалентного времени, дальнейший расчет диффузионного процесса при трении сводится к расчету диффузии при постоянной температуре по формуле (3).

В третьей главе приведена разработанная методика проведения экспериментальных исследований, описаны экспериментальная установка и приспособления, используемые при проведении исследований, описан разработанный вакуумный компактный трибометр (рис.2), приведены результаты экспериментальных исследований процессов газообмена на поверхностях вакуумного оборудования.

Целью проведения экспериментальных исследований была проверка разработанных теоретических положений, представленных в главе 2 и описывающих газообменные процессы на поверхностях материалов фрикционных пар.

При выполнении исследований были решены следующие задачи: – Проверена гипотеза о присутствии процесса наводороживания при «сухом» трении; – Уточнен объем источника водорода, растворяемого в материалах фрикционных пар, в частности определено влияния остаточного давления газа и расчетного количества сорбата на концентрацию растворяемого газа; – Получены необходимые значения констант, для использования в разработанной методике расчета распределения по глубине концентрации газов, растворяемых в мате-

Для проведения экспериментальных исследований был разработан метод «пробного» газа, для того чтобы исключить первоначальную фоновую концентрацию водорода в образцах и выделить изменения в процессе эксперимента. В качестве такого газа был использован близкий к водороду по своим свойствам изотоп – дейтерий. Количество дейтерия в естественной атмосфере очень мало, примерно в 10000 раз меньше количества водорода (0.015%). Парциальное давление дейтерия в естественной атмосфере при нормальных условиях составляет около $7 \cdot 10^{-6}$ Па.



С использованием экспериментальной трибоголовки на базе сильфонного ввода вращения было проведено исследование процесса наводороживания и при «сухом» трении в атмосфере. В качестве образца была использована пластина из стали 12X18H10T размером 10x15мм и толщиной 2 мм. В зоне трения произошло значительное увеличение концентрации водорода (рис.3). Водород за 5000 циклов трения продиффундировал почти на 5,5 мкм. Его концентрация вблизи поверхности составила $2 \cdot 10^{27}$ ат/м³.

10

парциального давления водорода в атмосфере. При этом максимальная концентрация водорода в зоне трения соответствует примерно 8,5% концентрации водорода в монослое.

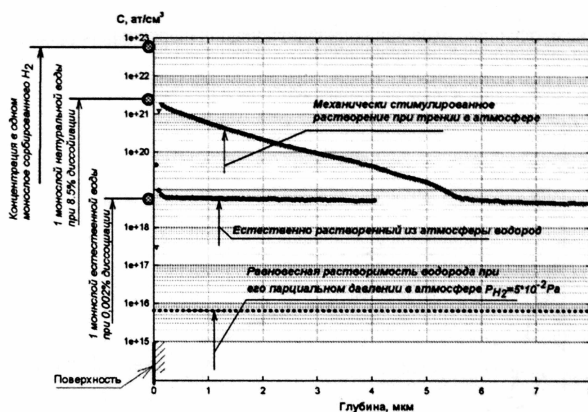


Рис.3 Распределение концентрации водорода по глубине образца из стали 12Х18Н10Т в зоне трения и на свободной поверхности

Для проверки гипотезы о роли сорбата в процессе газообмена был выполнен эксперимент по трению с предварительным выдерживанием образца из стали 12Х18Н10Т в дейтериевой воде для формирования монослоя сорбата D_2O на поверхности [10]. Для формирования слоя адсорбированной тяжелой воды D_2O полированный образец из нержавеющей стали 12Х18Н10Т предварительно очищался, а затем погружался в дейтериевую воду (D_2O) на 36 часов. После этого образец высушивался потоком теплого воздуха при температуре около $60^\circ C$ в течение 5 мин. После этого образец подвергался циклической фрикционной нагрузке с помощью шарикового индентора (стальной шарик диаметром 6 мм.).

Полученные результаты распределения дейтерия по глубине образца представлены на рис.4. Эксперименты подтвердили гипотезу о том, что основным источником водорода и дейтерия, растворяющихся в парах трения, является сорбированная на поверхности твердых тел вода. При этом ориентировочная доля сорбированных молекул, диссоциирующих в результате контактного механического воздействия, составляет не менее 27 % мономолекулярного слоя.

Для проверки предположения о возможности самопроизвольного наводо-

раживания, был выполнен эксперимент по растворению дейтерия в стали 12Х18Н10Т. Образец выдерживался в среде дейтерия при парциальном давлении $P_{D_2}=5 \cdot 10^4$ Па в течение трех месяцев. Герметизация при этом осуществлялась с помощью водяного затвора. Результаты исследования распределений концентрации дейтерия по глубине двух идентичных образцов – находившегося в среде дейтерия и не находившегося, представлены на рис.5.

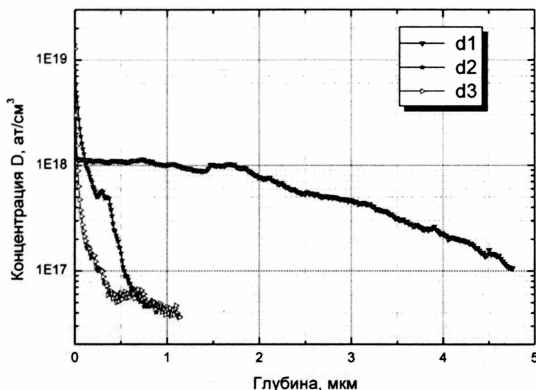


Рис.4 Распределение концентрации атомов дейтерия по глубине для исследованного образца, подвергнутого выдержке в тяжелой воде и последующему фрикционному воздействию (скорость трения $V_{ск}=13$ мм/с): d1- распределение концентрации в зоне контактных напряжений $\sigma_n=630$ МПа; d2 - распределение концентрации у видимой границы зоны трения; d3 – распределение концентрации в референсной точке, удаленной на 1,5 мм от видимой границы зоны контакта

Для более полного представления о процессах, происходящих при трении было выполнено исследование влияния трения скольжения на изменения химического состава поверхности нержавеющей стали [2]. Исследование химического состава выполнялось с помощью Оже-электронного спектрометра.

Эксперимент показал, что трение оказывает значительное влияние на изменения химического состава поверхности нержавеющей стали и основными изменениями являются возрастание количества Fe и снижение Cr в зонах, подвергающихся фрикционному воздействию.

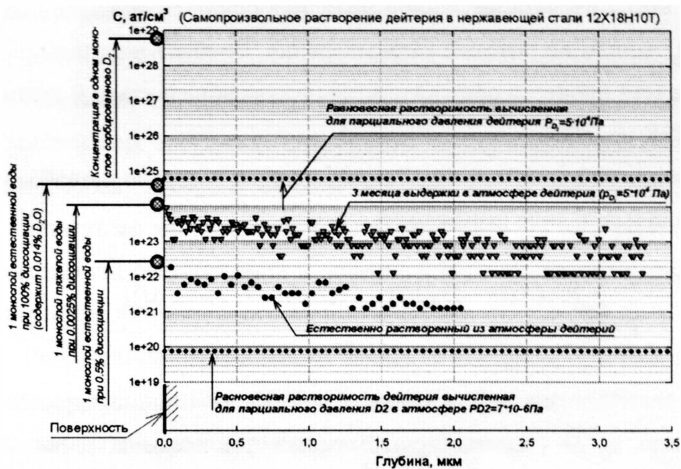


Рис.5 Самопроизвольная диффузия дейтерия в пластине из стали 12Х18Н10Т

Четвертая глава посвящена созданию методик расчета газообменных процессов при трении и при нахождении образца в водородосодержащей среде. Приведены примеры расчетов моделей диффузии для свободной поверхности и для зоны трения, которые показали достаточно хорошее соответствие с выполненными экспериментами (рис.6).

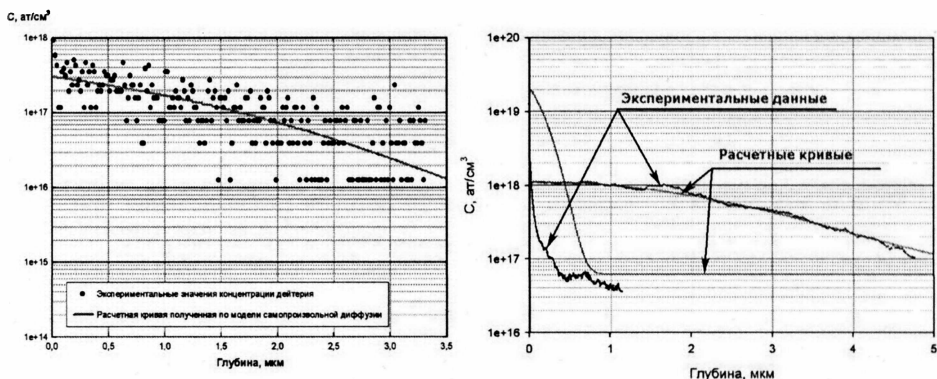


Рис.6 Сопоставление экспериментальных данных по исследованию диффузии дейтерия и расчетных кривых, полученных по созданным методикам расчета диффузионных процессов

Разработана методика расчета процесса обезгаживания металлических элементов вакуумного оборудования, базирующаяся на решении диффузион-

ных задач. Результаты расчета по данной методике показали хорошее соответствие известным данным по потокам газовыделения. На рис.7 показаны результаты примера расчета процесса обезгаживания нержавеющей стали в диапазоне температур от 373K до 673K.

Выражение для плотности потока газовыделения, согласно разработанной методике, представлено в виде выражения:

$$q_{\text{газ}}(t) = k \cdot T \cdot \frac{\sum_{n=1}^N [C_0(\Delta x(n-1/2), t) - C_0(\Delta x(n-1/2), t + \Delta t)] \cdot \Delta x}{\Delta t}, \quad (8)$$

где: k – постоянная Больцмана; T – температура, K; Δx – элементарный слой толщины материала, м; Δt – элементарный промежуток времени, с; N – число слоев, на которое условно разбивается приповерхностный слой металла при расчете газовыделения.

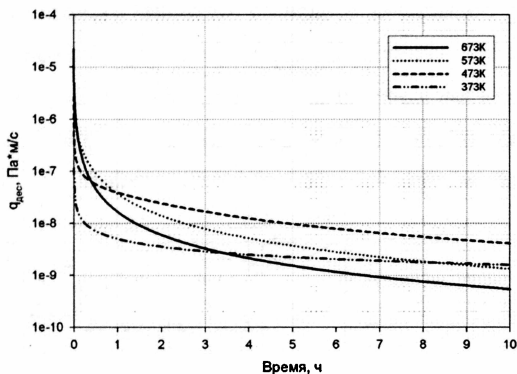


Рис.7 Модель изменения во времени плотностей потоков газовыделения при обезгаживающем прогреве при температурах 373K, 473K, 573K, 673K

ОБЩИЕ ВЫВООДЫ

1. Для повышения работоспособности кинематических пар вакуумного технологического оборудования и уточнения режимов обезгаживания элементов высоковакуумных систем необходимо уметь рассчитывать влияние сорбата остаточных газов, в частности, процесса наводороживания металлических поверхностей в вакууме.

2. При исследовании процесса искусственного наводороживания металлических поверхностей необходимо учитывать, что при самопроизвольном

растворении концентрация водорода в приповерхностных слоях на 5 порядков отличается (в меньшую сторону) от рассчитанной по известным моделям.

3. Показано, что одним из главных источников водорода, растворенного в металлических элементах вакуумного технологического оборудования, является слой воды, адсорбированной на контактных поверхностях, причем примерно треть этого монослоя сорбата (около 27% по результатам экспериментов) оказывается растворенной в поверхностных слоях материалов кинематических пар после фрикционного взаимодействия.

4. Возрастание парциального давления водорода при работе механизмов внутри вакуумной системы целесообразно использовать в качестве критерия приближающегося отказа одного из механизмов.

5. При расчете влияния сорбата на газонасыщение приповерхностных слоев металлических поверхностей элементов вакуумного оборудования рекомендуется применять модель диффузии из бесконечного источника с постоянной концентрацией для зоны свободной поверхности и модель диффузии из слоя конечной толщины для зон трения.

6. Для повышения достоверности расчета режимов обезгаживания элементов вакуумных систем рекомендуется использовать разработанную методику, учитывающую влияние сорбата остаточных газов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Friction as a reason of gases solution in metals / E.A.Deulin, S.A.Goncharov, V.V.Konovalov, R.A.Nevshupa. // International Tribology Conference. - Nagasaki (Japan), 2000. - P.245
2. Study of mechanical and chemical properties of stainless steel variation as a result of friction in vacuum / R.A.Nevshupa, J.L. de Segovia, E.A.Deulin, V.V.Konovalov // Abstract book of 18th European Conference on Surface Science. – Vienna (Austria), 1999. – P.73.
3. Residual gases solution in bulk at friction / E.A.Deulin, S.A.Goncharov, V.V.Konovalov, R.A.Nevshupa // 9-th Nordic Symposium on Tribology. – Porvoo (Finland), 2000. – V.3. – P.855-861.
4. Механически-стимулированное растворение адсорбированных водорода и

- дейтерия в стали / Е.А.Деулин, С.А.Гончаров, В.В.Коновалов, Р.А.Невшупа // Материалы IV-го международного симпозиума по трибологии трякционных материалов «ЯРОФРИ – 2000». - Ярославль, 2000. - С.101-107
5. Deulin E.A., Konovalov V.V., Nevshupa R.A. SIMS analysis of gases solution at friction in vacuum // 2-nd Europe workshop “SIMS Europe-2000”. - Muenster (Germany), 2000. - P.80
6. Deulin E.A., Konovalov V.V., Nevshupa R.A. Gases solution in metals at friction // Abstract of papers of 2nd Worls Tribology Congress. – Vienna (Austria), 2001. – P.34
7. Analysis of natural and mechanically stimulated gases solution / E.A. Deulin, V.V. Konovalov, D.N. Lebedev et al. // 7th European Vacuum Connference. – Madrid (Spain), 2001. – P.215-220
8. Konovalov V.V., Rodina E.A. Sorbed water as the source of the dissolved hydrogen and deuterium in solids // Book of abstracts of the joint Russian-Japanese tribology workshop and seminar on nanotechnology. – Moscow, 2002. – P.14
9. 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.
10. Механически-стимулированные процессы диссоциации сорбированной тяжелой воды (D₂O) и растворения дейтерия в нержавеющей стали / Е.А.Деулин, В.В.Коновалов, Ю.М.Пустовойт и др. // Вакуумная техника и технология. - 2003. - Том 13, номер 3. - С. 157-161
11. Mechanically stimulated dissociation of sorbed heavy water (D₂O) and deuterium dissolution in stainless steel / E.A.Deulin, V.V.Konovalov, Y.M.Pustovoit et al. // 16th International Vacuum Congress. – Venice (Italy), 2004. - P.105

У1783609

Коновалов В.В.
Исследование влияния
сорбата остаточных газов на

1783609

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

Подписано в печать 25.04.2007 г.

Исполнено 25.04.2007 г.

Печать трафаретная.

Заказ № 473

Тираж: 100 экз.

Типография «11-й ФОРМАТ»

ИНН 7726330900

115230, Москва, Варшавское ш., 36

(495) 975-78-56

www.autoreferat.ru

h