

УДК 621.89-78

Проектирование внутрикамерных устройств вакуумного оборудования для экологически чистых и энергосберегающих технологий

© Авторы, 2011

В.А. Васин – к.т.н., доцент, МИЭМ

E-mail: vacuumwa@list.ru, vacuumwa@ya.ru

Е.Н. Ивашов – д.т.н., проф., МИЭМ

E-mail: ienmiem@mail.ru

П.С. Кузнецов – аспирант, МИЭМ**С.В. Степанчиков** – к.т.н., доцент, МИЭМ

Рассмотрены особенности проектирования элементов и устройств вакуумного оборудования, предназначенных для реализации экологически чистых и энергосберегающих технологий в электронном производстве; выполнены расчёты коэффициентов трения материалов, работающих в вакууме, в зависимости от разрежения окружающей среды, для различных случаев контактного взаимодействия, а также интенсивности изнашивания пар трения в зависимости от нагрузки, микрогеометрии контакта, скорости скольжения, остаточного давления в вакуумной камере и механических характеристик материалов, позволяющие снизить уровень загрязнений, привносимых в проектируемом оборудовании, и повысить выход годных изделий электронной аппаратуры.

Ключевые слова: экологически чистые технологии, вакуумное оборудование, внутрикамерные устройства, микрочастицы износа, привносимая дефектность, интенсивность изнашивания, коэффициент трения.

Features of designing of elements and the devices of the vacuum equipment intended for realization of non-polluting and power saving up technologies in electronic manufacture are considered. Calculations of factors of a friction of the materials working in vacuum, depending on environment depression, for various cases of contact interaction, from intensity of wear process of friction pairs depending on loading, micro geometry of contact piece, speed of slippage, residual pressure and mechanical characteristics of the materials are executed, allowing to lower level of pollution and to raise an exit of effective articles of electronic technics.

Keywords: non-polluting technologies, vacuum equipment, intrachamber devices, microparticles wear, introduced by the defects, wear rate, coefficient of friction.

Особенности современного электронного производства, основанного на использовании физико-химических свойств веществ и процессов, протекающих на молекулярном и атомарном уровнях, и необходимость осуществления технологических процессов в экологически чистом вакууме с минимальным энергетическим воздействием на изделия электронной техники и радиопаратуры требуют отличного от общепринятого в машино- и приборостроении подхода к проектированию оборудования. Стремление автоматизировать технологические процессы в вакууме заставляет разрабатывать экологически совершенные внутрикамерные устройства и системы, надёжность которых во многом зависит от надёжности работы узлов трения [1].

В свою очередь, автоматизация сложных технологических процессов требует размещения в рабочих вакуумных объёмах механических устройств, являющихся источниками генерации «загрязнений», так называемой привносимой дефектности вакуумной среды, в том числе наиболее опасным их видом – загрязняющими микрочастицами износа, которые, попадая на обрабатываемые объекты, значительно снижают выход годных изделий электронной техники.

При проектировании внутрикамерных устройств вакуумного оборудования для экологически чистых и энергосберегающих технологий необходимо знать такие трибологические параметры, как коэффициенты трения и интенсивность изнашивания материалов в условиях вакуума [2].

Анализ многочисленных экспериментальных данных по трению твёрдых тел в вакууме показывает, что в общем случае коэффициент трения материалов определяется как [3]

$$f = F_{\text{адг}} + \frac{F_{\text{деф}}}{T},$$

где $F_{\text{адг}}$ – сила адгезионного взаимодействия микронеровностей во фрикционном контакте; $F_{\text{деф}}$ – сила деформационного взаимодействия микронеровностей во фрикционном контакте; T – нагрузка, действующая на одну микронеровность, которая смоделирована в виде сферического сегмента пятна контакта.

Адгезионная составляющая силы трения будет в виде [4]

$$F_{\text{адг}} = PE_{\text{св}} \cdot \frac{n}{\text{КЧ} \cdot d},$$

где P – вероятность образования адгезионных связей; $E_{\text{св}}$ – энергия связи; n – число граничных атомов на площадке контакта; КЧ – координационное число для кристаллической структуры, находящейся в контакте; d – расстояние между ближайшими «соседями» в кристаллической решетке.

Учитывая влияние окружающей среды, можно найти среднее число атомов n на площадке контакта:

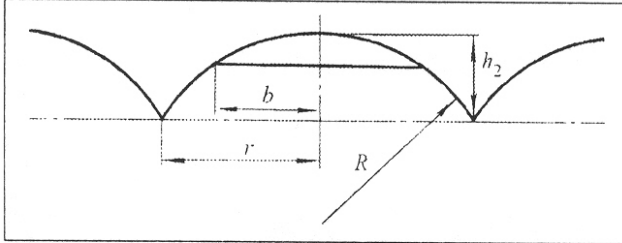


Рис. 1. Модель шероховатости реальной поверхности в виде сферических сегментов

Таблица 1. Значения параметров шероховатости для различных видов обработки

Класс шероховатости	h_2 , мкм	R , мкм
Шлифование		
5	18	35
6	9	100
7	4,7	180
8	2,3	370
9	1,2	550
Полирование		
8	2,3	230
9	1,2	450
10	0,6	670

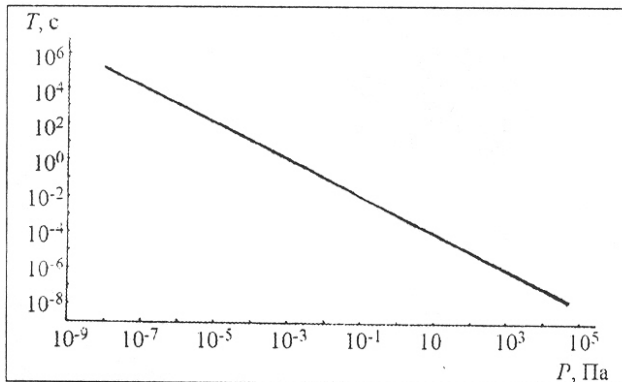


Рис. 2. Зависимость времени образования монослоя молекул на поверхности тела T от степени разрежения в вакуумной камере P

Если $t = T$, то на поверхности фрикционного контакта образуется монослой молекул воздуха.

Если $t > T$, то на поверхности фрикционного контакта образуется полислой молекул воздуха.

Если $t < T$, то поверхность контакта покрывается лишь частично молекулами воздуха, а вся площадь контактного взаимодействия A_B условно делится на две: $A_B = A_{\text{адс}} + A_{\text{юв}}$, где $A_{\text{адс}}$ – площадь единичного пятна контакта, покрытая адсорбированными молекулами; $A_{\text{юв}}$ – ювенильная площадь контактного взаимодействия.

В зависимости от величины остаточного давления в вакуумной камере соотношение между $A_{\text{адс}}$ и $A_{\text{юв}}$ будет различным.

Адгезионное взаимодействие происходит лишь на площадке $A_{\text{юв}}$. Введя параметр

$$n = 2A_{\text{юв}} / (\pi \cdot S_B),$$

где $A_{\text{юв}}$ – ювенильная площадка контакта, на которой полностью отсутствует слой молекул адсорбированного газа; S_B – площадь элементарного базиса, зависящая от кристаллической структуры металла.

Величина площадки контакта определяется из модели шероховатости, представленной на рис. 1.

Ориентировочные значения параметров шероховатости приведены в табл. 1 [5].

В соответствии с работой [6] величина пятна контакта двух сфер радиуса R из различных материалов для случая их упругого взаимодействия будет в виде

$$b = 1,4 \cdot \sqrt[3]{R^2 h_2 p_0 \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)},$$

а в случае пластического контактного взаимодействия

$$b = 0,618 \cdot \sqrt[3]{p_0 \frac{R h_2}{H_\mu}},$$

где R – радиус сегмента (рис. 1); h_2 – высота микронеровностей; p_0 – удельное давление в контакте; E_1 , E_2 – модули упругости для материалов, находящихся во фрикционном контакте; H_μ – микронеровность более мягкого материала.

Из [7] известно, что с учетом вероятности осаждения молекул на чистой поверхности при ударе время T , в течение которого происходит образование монослоя молекул на поверхности тела, определяется по графику, показанному на рис. 2.

Осаждение молекул между контактами микронеровностей, происходит в течение некоторого времени t за которое происходит перемещение фрикционного контакта с одних пар микронеровностей на другие. Время t является временем паузы: $t = S / v$, где S – путь, пройденный микронеровностью до следующего контактного взаимодействия, $S = 2(r - b)$, r – радиус основания сегмента; v – скорость скольжения во фрикционном контакте.

$$K = \frac{I}{T} = \frac{A_{\text{адс}}}{A_{\text{адс}} + A_{\text{юв}}}, \text{ или } K = \frac{A_{\text{в}} - A_{\text{юв}}}{A_{\text{в}}} = 1 - \frac{A_{\text{юв}}}{A_{\text{в}}},$$

получим $A_{\text{юв}}/A_{\text{в}} = 1 - K$, $A_{\text{юв}} = A_{\text{в}}(1 - K)$.

Тогда среднее число атомов n на площадке контакта, которые еще не закрыты монослоем молекул воздуха, равно $n = 2A_{\text{в}}(1 - K)/(\pi S_{\text{в}})$.

Сила деформационного взаимодействия микронеровностей во фрикционном контакте определяются следующим выражением:

$$\text{при упругом контактном взаимодействии } F_{\text{деф}} = \sigma_{-1} \cdot b(R - \sqrt{R^2 - b^2}),$$

$$\text{при пластическом контактном взаимодействии } F_{\text{деф}} = \sigma_T \cdot b(R - \sqrt{R^2 - b^2}),$$

где σ_{-1} , σ_T – соответственно пределы усталости и текучести на смятие для более мягкого материала фрикционного контакта; b – ширина пятна контакта; R – радиус смоделированной микронеровности.

Конечные формулы для определения коэффициентов трения примут вид для упругого контакта;

$$f = 2PE_{\text{св}}A_{\text{в}}(1 - K) + \frac{\pi S_{\text{в}} \cdot K\chi \cdot d\sigma_{-1}b(R - \sqrt{R^2 - b^2})}{4\pi S_{\text{в}} \cdot K\chi \cdot dp_0r^2}, \quad (1)$$

для пластического контакта

$$f = 2PE_{\text{св}}A_{\text{в}}(1 - K) + \frac{\pi S_{\text{в}} \cdot K\chi \cdot d\sigma_T b(R - \sqrt{R^2 - b^2})}{4\pi S_{\text{в}} \cdot K\chi \cdot dp_0r^2}. \quad (2)$$

Предложенные формулы для определения коэффициентов трения материалов, работающих в вакууме, в зависимости от разрежения окружающей среды, для случая упругого и пластического контакта, могут быть использованы при проектировании внутрикамерных устройств вакуумного оборудования.

Окончательный выбор материалов пар трения следует производить после экспериментальной проверки полученных теоретических зависимостей. Для этих целей разработана сверхвысоковакуумная экспериментальная установка. Установка состоит из вакуумной камеры, на фланцах которой размещены привод вращения с сильфонной герметизацией, со стабильно регулируемой частотой вращения вала, а также водоохлаждаемый привод поступательного движения с сильфонной герметизацией. В торцах устройств монтируются исследуемые образцы. Один из образцов вращается, а другой, перемещаясь поступательно, создает осевое нагружение, осуществляемое на атмосфере с помощью грузов. Для измерения температуры в зоне трения размещены две термодпары, сигналы с которых поступают на потенциометры. Система откачки включает в себя механический насос НВР-16Д и турбомолекулярный насос 01АБ1500 со скоростью откачки 750 л/с.

Установка позволяет исследовать фрикционные характеристики материалов и твердых смазочных покрытий внутрикамерных устройств вакуумного оборудования.

По экспериментальным данным коэффициент трения определяется из выражения [1]

$$f = \frac{\eta(J_{\text{пол}}u_{\text{пол}} - J_{\text{хх}}u_{\text{хх}})}{T_1 \pi n_1 (R_{\text{мин}} + R_{\text{макс}})},$$

где η – коэффициент полезного действия электродвигателя; $J_{\text{пол}}$ – ток при работе электродвигателя под нагрузкой; $u_{\text{пол}}$ – напряжение, потребляемое электродвигателем во время работы под нагрузкой; $J_{\text{хх}}$ – ток при работе электродвигателя на холостом ходу; $u_{\text{хх}}$ – напряжение, потребляемое двигателем на холостом ходу; T_1 – величина нагрузки; n_1 – частота вращения; $R_{\text{макс}}$, $R_{\text{мин}}$ – соответственно максимальный и минимальный радиусы элементов узла трения.

Температура поверхностей трения определяется по тарировочному графику через зависимости

$$t_{\text{пов}} = F(t_1, P); \quad t_{\text{пов}} = F(t_2, P),$$

где t_1 , t_2 – температура в двух точках устройства осевого нагружения; P – разрежение в вакуумной камере.

Значения коэффициентов трения металлов, твердых смазочных покрытий и антифрикционных материалов в атмосфере и вакууме представлены в табл. 2 [8].

Таблица 2. Коэффициенты трения металлов, твердых смазочных покрытий и антифрикционных материалов в атмосфере и вакууме

Материал трения	Материал контртела	Коэффициент трения	
		в атмосфере	в вакууме
1	2	3	4
Медь	Никель	0,45	1,50
Тантал	Никель	0,23	0,90
Вольфрам	Никель	0,21	1,36
Медь	Железо	0,51	0,75
Тантал	Медь	0,44	0,43
Вольфрам	Медь	0,34	0,41
Никель	Вольфрам	0,30	0,60
Никель	Никель	0,60	4,60
Золото	Золото	0,60	4,50
Алюминий	Алюминий	0,78	1,57
Бериллиевая бронза	Бериллиевая бронза	0,58	1,10
Латунь	Латунь	0,31	0,70
Медь	Медь	1,04	2,00
Нержавеющая сталь	Нержавеющая сталь	0,51	0,93
Сталь ШХ15	Медь	0,70	0,45
Нержавеющая сталь	Алюминий	0,40	0,34
Нержавеющая сталь	Латунь	0,39	0,84
Бериллиевая бронза	Латунь	0,38	0,90
Латунь	Бериллиевая бронза	0,36	0,89
Медь	Сталь ШХ15	0,55	0,96
Серебро	Железо	–	0,30
Никель	Железо	–	0,69
Серебро	Никель	–	0,86
Алюминий	Железо	–	1,28
Алюминий	Медь	–	1,47
Серебро	Медь	–	1,72
Алюминий	Серебро	–	2,20
Алюминий	Никель	–	2,36
Железо	Железо	–	0,80
Серебро	Серебро	–	2,60
Металлокерамическая бронза	Сталь 2Х13	–	0,80
Кадмий	Кадмий (покрытие)	0,39	0,31
Серебро	Серебро (покрытие)	0,36	0,89
Сплав АМг-6	Титановый сплав ВТ-14	0,73	1,18
Сплав МА2-1	Титановый сплав ВТ-14	–	0,80
Дисульфид молибдена	Сталь 2Х13	–	0,17
Дисульфид вольфрама	Сталь 2Х13	–	0,15
Дисульфид ниобия	Сталь 2Х13	–	0,07
Дисульфид тантала	Сталь 2Х13	–	0,06
Диселенид молибдена	Сталь 2Х13	–	0,17
Диселенид вольфрама	Сталь 2Х13	–	0,10
Диселенид ниобия	Сталь 2Х13	–	0,17
Диселенид тантала	Сталь 2Х13	–	0,09
Графит	Сталь 2Х13	–	0,14
ПТФЕ	Сталь 2Х13	–	0,25
АМАН	Сталь 2Х13	–	0,15
АМАН (облучение ионами водорода)	Сталь 2Х13	–	0,11
Стирол	Сталь ШХ15	–	0,55
Стирол (облучение потоком электронов)	Сталь ШХ15	–	0,62
ε-капролактам	Сталь ШХ15	–	0,23
ε-капролактам (облучение потоком электронов)	Сталь ШХ15	–	0,51

Продолжение табл. 2

1	2	3	4
Сталь 45 с фосфатным покрытием	12X18H10T	–	0,40
Сталь 45 с фосфатным покрытием	Сталь ШХ15	–	0,30
Сталь 45 с кадмиевым покрытием	12X18H10T	–	0,51
Сталь 45 с кадмиевым покрытием	Сталь ШХ15	–	0,24
Сталь 45 с цинковым покрытием	12X18H10T	–	0,50
Сталь 45 с цинковым покрытием	Сталь ШХ15	–	0,49
Сталь 45 с хромовым покрытием	12X18H10T	–	0,40
Сталь 45 с хромовым покрытием	Сталь ШХ15	–	0,30
Сталь 45 с никелевым покрытием	12X18H10T	–	0,42
Сталь 45 с никелевым покрытием	Сталь ШХ15	–	0,30
Сталь 45 с оловянным покрытием	12X18H10T	–	0,22
Сталь 45 с оловянным покрытием	Сталь ШХ15	–	0,30
Д16Т	12X18H10T	–	0,40
12X18H10T	Латунь ЛС-59-1	–	0,40
12X18H10T	Сталь ШХ15	–	0,60
Мель МЗ сульфацинированная	12X18H10T	–	0,20

Необходимыми данными для проектирования элементов передач и опорных узлов внутрикамерных устройств вакуумного оборудования являются данные по величине интенсивности изнашивания.

Контактирующие поверхности реального механизма никогда не бывают совершенно гладкими и поэтому в действительности реакции на контактирующих поверхностях не являются нормальными.

Поверхности узлов трения защищены сорбированными и окисным слоями. В атмосфере слои, изношенные в процессе трения, практически мгновенно восстанавливаются. В вакууме же для их восстановления требуется время, поэтому вероятность схватывания возрастает.

Рассмотрим узел трения, состоящий из двух деталей, которые перемещаются относительно друг друга в вакууме. На поверхностях трения удерживается окисный слой с энергией удержания, равной $2e$. Одна деталь вращается и находится в контакте с другой, создающей осевое нагружение. Площадь контакта $S = C_{cp} l$, где C_{cp} – длина поверхности трения для кольца; l – ширина контактной зоны. Касательное напряжение между деталями узла трения равно

$$\tau = f \cdot \frac{T_1}{S} \quad (3)$$

Работа трения определяется в виде

$$A = 2 \int_0^{C_{cp}} y l \tau \cdot dy = C_{cp}^2 l \tau = C_{cp} S \tau.$$

Поскольку в вакууме отсутствует конвективный теплообмен и в предположении отсутствия потерь в результате теплопроводности, с учетом (3) запишем выражение

$$C_{cp} S \frac{f T_1}{S} = 2e S,$$

откуда

$$T_1 = T_{1max} = 2 \frac{el}{f}.$$

Здесь T_{1max} – максимальная нагрузка, при которой поверхностные слои изнашиваются сразу и схватывание происходит за один оборот.

Если действующая нагрузка меньше T_{1max} , то схватывание произойдет, но после определенного количества циклов N .

Для полного износа поверхностных слоев площади контакта необходимо затратить энергию

$$N C_{cp} f \sigma_H = e S, \quad (4)$$

где σ_H – среднее контактное напряжение по Герцу.

Из формулы (4) найдем число циклов работы узла трения в вакууме до схватывания:

$$N = \frac{e}{fC_{\text{ср}}\sigma_{\text{н}}}$$

На площадках контакта происходит два вида изнашивания – деформационное и адгезионное. Суммарное изнашивание равно

$$J_{\Sigma} = J_{\text{деф}} + J_{\text{адг}} \quad (5)$$

Интенсивность линейного изнашивания J_h определяется как средняя толщина изношенного слоя поверхности материала Δh , удаленная с единицы пути трения L : $J_h = \Delta h / L$.

Фактически материал удаляется лишь с реальных пятен касания, поэтому вводится понятие удельной интенсивности изнашивания i_h , величина которой выражается зависимостью [9] $i_h = \Delta h_1 / l$, где Δh_1 – средняя толщина изношенного слоя пятна контакта; l – путь трения, равный диаметру пятна контакта.

При условии, что изнашивание идет равномерно во времени и по поверхности, установившийся процесс отделения материала на всем пути трения равен средней интенсивности изнашивания за одно нарушение фрикционной связи:

$$J_h = i_h \cdot \frac{A_{\text{ф}}}{A_{\text{н}}}, \quad (6)$$

где $A_{\text{ф}}$ – фактическая площадь контакта; $A_{\text{н}}$ – номинальная площадь контакта.

При деформационном изнашивании принимаем, что за одно фрикционное взаимодействие происходит удаление слоя $\Delta h_1 / N_1$, где N_1 – число циклов деформации до разрушения.

Если напряжение в контакте превышает допустимое, то, согласно [10], число циклов деформации до разрушения будет в виде

$$N_1 = 10^7 \left(\frac{\sigma_{\text{НР}}}{\sigma_{\text{экр}}} \right)^6,$$

где $\sigma_{\text{НР}}$ – допускаемое контактное напряжение; $\sigma_{\text{экр}}$ – эквивалентное контактное напряжение.

$\sigma_{\text{экр}} = \sigma_{\text{н}} \sqrt{1 + 4f^2}$, $\sigma_{\text{н}}$ – контактное напряжение в зоне контактирования двух микронеровностей.

$\sigma_{\text{н}} = 1,5 \frac{T}{\pi b} = 6 \frac{r^2}{\pi b}$, f – коэффициент трения определяемый по формулам (1) и (2).

При вводе параметров T и l и с учетом выражений (5) и (6) интенсивность деформационного и адгезионного изнашиваний будет определяться выражениями

$$J_{\text{деф}} = i_{\text{деф}} \frac{A_{\text{адс}}}{A_{\text{н}}} = K i_{\text{деф}} \frac{A_{\text{в}}}{A_{\text{н}}}; \quad J_{\text{адг}} = i_{\text{адг}} \frac{A_{\text{юв}}}{A_{\text{н}}} = (1 - K) i_{\text{адг}} \frac{A_{\text{в}}}{A_{\text{н}}},$$

откуда $J_{\Sigma} = J_{\text{деф}} + J_{\text{адг}} = \left[K \cdot i_{\text{деф}} + (1 - K) i_{\text{адг}} \right] \cdot \frac{A_{\text{в}}}{A_{\text{н}}}$, где $i_{\text{деф}} = \frac{R - \sqrt{R^2 - b^2}}{2bN}$; $i_{\text{адг}} = \frac{R - \sqrt{R^2 - b^2}}{2b}$.

Окончательно получим

$$J_{\text{деф}} = K \frac{R - \sqrt{R^2 - b^2}}{2Nb} \cdot \frac{A_{\text{в}}}{A_{\text{н}}}, \quad (7)$$

$$J_{\text{адг}} = (1 - K) \frac{R - \sqrt{R^2 - b^2}}{2Nb} \cdot \frac{A_{\text{в}}}{A_{\text{н}}}, \quad (8)$$

где b – ширина пятна контакта, равная при упругом контакте:

$$b = 1,4 \sqrt[3]{R^2 h_2 p_0 \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)}$$

При пластическом контакте

$$b = 0,618 \sqrt{p_0 h_2 \frac{R}{H_{\mu}}} \text{ при } R \gg R_{\text{макс}}, \text{ или } b = 0,437 \sqrt{p_0 h_2 \frac{2R - h_2}{H_{\mu}}} \text{ при } R > R_{\text{макс}}.$$

Здесь E_1, E_2 – модули упругости контактирующих материалов; R, h_2 – параметры шероховатости поверхности; p_0 – удельное давление в контакте; H_μ – микротвёрдость.

Полученные выражения позволяют рассчитывать коэффициенты трения и интенсивность изнашивания любых пар трения материалов внутрикамерных устройств вакуумного оборудования в зависимости от нагрузки, микрогеометрии, скорости скольжения, остаточного давления в вакуумной камере и их механических характеристик, а также снижать энергетические затраты в проектируемых системах.

Результаты проведённых исследований необходимо использовать при проектировании внутрикамерных устройств вакуумного оборудования для экологически чистых и энергосберегающих технологий, в том числе:

при составлении требований и определении параметров работоспособности внутрикамерных устройств;

при количественном определении параметров материала, формы и нагрузки на узлы трения внутрикамерных устройств (размеров, оптимальных материалов и твёрдосмазочных покрытий);

при проведении функционального анализа основных структур проектируемых устройств с сопоставлением возможных вариантов;

при проведении анализа трибологических параметров (определении типа трения и износа, анализа граничного состояния с учётом параметров узлов трения);

при оценке работоспособности конструкции на основе параметров и моделей для описания надёжности, экологического и энергетического совершенства внутрикамерных устройств вакуумного оборудования.

Литература

1. Степанчиков С.В. Исследование работоспособности узлов трения автоматических вакуумных манипуляторов // Автоматические манипуляторы и металлообрабатывающее оборудование с программным управлением. Тула: ТПИ. 1986. С. 106–110.
2. Курманалиев Т.И., Некрасов М.И., Ивашиов Е.Н., Степанчиков С.В. Определение коэффициентов трения материалов НКА, работающей в вакууме // Конструирование научных космических приборов. М.: Наука. 1985. С. 106–110.
3. Боуден Ф., Тейбор Д. Трение и смазка твёрдых тел. М.: Машиностроение. 1968.
4. Карапетян С.С. Адгезионная Модель трения // ДАН СССР. М.: Машиностроение. 1968.
5. Трение изнашивание и смазка: Справочник в 2-х книгах. Кн. 1. М.: Машиностроение. 1978.
6. Тимошенко С.П. Справочник материалов. Ч.2. Л.-М.: ГТИИ. 1938.
7. Гельман А.С. Основы сварки давлением. М.: Машиностроение. 1970.
8. Ивашиов Е.Н., Некрасов М.И., Степанчиков С.В. Коэффициенты трения металлов, твёрдых смазочных покрытий и антифрикционных материалов в атмосфере и вакууме: Стандарт СТП МИЭМ 24-85. М.: МИЭМ. 1986.
9. Крагельский И.В. и др. Трение и износ в вакууме. М.: Машиностроение. 1973.
10. Решетов Д.Н. Детали машин. М.: Машиностроение. 1989.

Поступила 11 декабря 2010 г.

Designing of Intrachamber Devices of the Vacuum Equipment for Non-Polluting and Power Saving up Technologies

© Authors, 2011

V.A. Vasin, E.N. Ivashov, P.S. Kuznetsov, S.V. Stepanchikov

The article deals with design features in-chamber devices, vacuum process equipment, implementing environmentally friendly and energy-saving technologies in the production of electronic devices. Presents methods for calculating the coefficients of friction materials, working in a vacuum, depending on the dilution of the environment, for the cases of elastic and plastic contact interaction, as well as the method of calculating the rate of wear of friction pairs, depending on load, micro geometry contact, sliding velocity, the residual pressure in vacuum chamber and the mechanical characteristics of materials. Given the dependence of the formation of a monolayer of molecules on the surface of the body on the degree of vacuum in the vacuum chamber. A description of the developed ultra-high vacuum setup for the investigation of frictional properties of materials and solid lubricant coatings.

The results can be used in the process of designing an environmentally perfect vacuum equipment to increase the yield of high-tech products, which is especially relevant for modern energy-saving technologies.