ВНИИНМАШ

# МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ В ВАКУУМЕ

Р 50-54-107-88

gost.e-ecolog.ru

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО СТАНДАРТАМ
(Госстандарт СССР)

Всесоюзный научно-исследовательский институт
по нормализации в машиностроении
(ВНИИНМАШ)

Утверждены
Приказом ВНИИНМАШ
№ 33 от 8.2.88г.

# Методы оценки триботехнических свойств материалов и покрытий в вакууме

Р 50-54-107-88

Москва 1989

УДК 621.891 Группа Т51

РЕКОМЕНДАЦИИ

Методы оценки триботехнических свойств материалов и покрытий в вакууме

Р 50-54-107-88

ОКСТУ 0023

Настоящие рекомендации (Р) устанавливают экспериментальные методы оценки триботехнических свойств металлических и неметаллических материалов и покрытий в вакууме по коэффициенту трения, износостойкости и эксплуатационным условиям их рационального использования.

Предназначены для специалистов в области износостойкости и надежности узлов трения новой техники, НИИ, КБ и других организаций машиностроения.

## I. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.I. Методы триботехнических испытаний материалов и покрытий можно классифицировать по четырем категориям (табл.I).

Таблица I

Методы триботехнических испытаний

| Категории испытаний | Объект | Виды | Оцениваемые характеристики |
|---|---|---|---|
| Лабораторные | Материал | Оценочные | Триботехнические характеристики |
| Лабораторные | Материал | Определительные, имитирующие эксплуатационные условия трения и изнашивания | Износостойкость в заданных условиях |

| Категории испытаний | Объект | Виды | Оцениваемые характеристики |
|---|---|---|---|
| 3. Стендовые | Деталь, узел | Контрольные | Износостойкость в заданных условиях |
| 4. Эксплуатационные | Узел, агрегат | Контрольные, эксплуатационные | Износостойкость в реальных условиях |

Указанные категории отличаются степенью приближения режимов испытаний к эксплуатационным и назначением. Испытания первой категории позволяют получить сравнительную оценку триботехнических характеристик новых материалов, контролировать их стабильность, рассчитать допустимые режимы нагружения в эксплуатации и др.

Результаты испытаний второй категории служат для анализа работоспособности и износостойкости материала в заданных режимах трения и смазки на стадии отработки конструкции, получения исходных данных для расчета и прогнозирования износа узла трения.

Испытания третьей категории (деталей и узлов) проводятся в условиях, соответствующих типовому эксплуатационному режиму, и предназначены для установления ориентировочных сроков службы детали и предельно допустимого износа, анализа эффективности мероприятий по повышению надежности узла и др.

Последняя категория испытаний позволяет получить оценку работоспособности изделия при эксплуатации.

1.2. Данные рекомендации относятся к испытаниям первых двух категорий и распространяются на металлические и неметаллические материалы, применяемые в виде деталей трущихся пар или тонкослойных покрытий, подвергаемых фрикционному взаимодействию с металлом. Устанавливают методы

определения коэффициента трения, скорости и интенсивности изнашивания на воздухе и в вакууме.

## 2. КЛАССИФИКАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ И МАШИН ТРЕНИЯ

2.1. Узлы трения, применяемые в изделиях, разделяются по контактам: точечные (сферические опоры, шарниры и др.), линейные (зубчатые передачи, кулачковые пары, радиальные подшипники скольжения и др.) и по плоской поверхности (подпятники). Схемы, имитирующие работу большинства реальных узлов трения, реализуются на машинах типа: торцовые (Трибовак Т), вал-втулка (Трибовак В), роликовые (Трибовак Р) (табл.2). Переход от одной схемы к другой связан исключительно с заменой узла трения.

2.2. Для испытаний узлов трения - поршень-цилиндр, плунжерная пара, цилиндрические направляющие втулок, штепсельных разъемов, направляющих штифтов и др. применяются указанные в табл. машины с возвратно-поступательным движением ("Трибовак ВП").

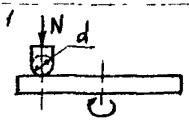
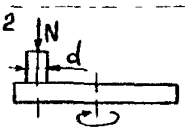
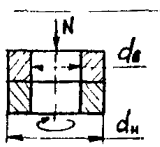
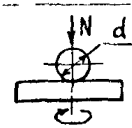
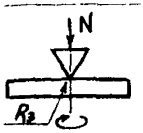
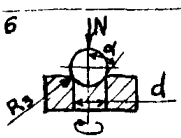
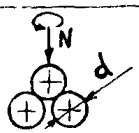
2.3. Форма и размеры образцов зависят от схемы испытаний и типа машины. При испытаниях второй категории вращающийся образец выполняют из того же материала, что и деталь натурного узла или (если это условие трудно выполнимо) неподвижный - из материала с большей теплопроводностью.

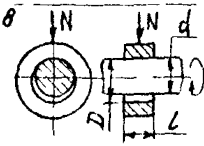
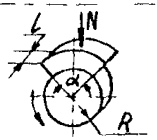
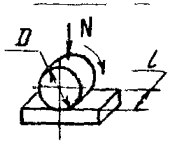
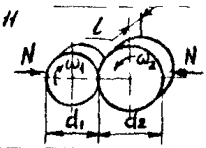
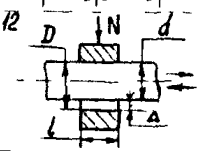
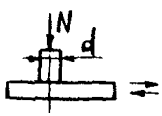
2.3.1. Для проведения одной серии испытаний образцы изготовляют из материала одной марки и плавки и по единой технологии. Макро- и микроструктура, а также твердость образцов должны быть близкими. (предельные отклонения по твердости - не более $\pm$ HB 10 или $\pm$ HRC 1).

Шероховатость поверхности рабочей части образцов - по ГОСТ 2789-73 для одной серии испытаний фрикционных пар - 7-8 класс, антифрикционных - 9-10 (если по условиям испытаний обработка образцов не должна соответствовать обработке реального узла трения).

Таблица 2

Схема узлов трения для лабораторных триботехнических испытаний

| Тип машины трения | Вид контактной пары | Основные формулы | Объекты контроля, имитируемые узлы | Стенды для испытаний в вакууме | Аналоги машин трения для испыт. в атмосферн. услов. |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| ТОРЦЕВЫЕ | 1   | $P_a = 0{,}918\sqrt[3]{\frac{N}{d^2 K}}$ $K = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}$ $\mu$ – коэфф. Пуассона $E$ – модуль упругости | Технологический контроль триботехнических характеристик материалов | Трибовак Т-I | МДП-I ЧШМ УТИ |
| | 2   | $P_a = \frac{4N}{\pi d^2}$ | Шпоночные и шлицевые направляющие, имитация ходовой резьбы | Трибовак Т-I | УМТ-I МДП-I МПИ-I УТИ |
| | 3   | $P_a = \frac{4N}{\pi(d_н^2 - d_в^2)}$ | Подпятники, торцевые опоры, торцевые уплотнения | Трибовак Т-2 (Т) Трибовак Т-I | И-47 УМТ-I МУТ-I УТИ |
| | 4   | $P_a = 0{,}918\sqrt[3]{\frac{N}{d^2 K}}$ $K = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}$ $\mu$ – коэфф Пуассона $E$ – модуль упругости | Шаровые опоры и шарниры | Трибовак Т-2 (Ш) | ОТ-I УТИ |
| | 5   | $P = 0{,}617\sqrt[3]{\frac{NE_{пр}^2}{R_з}}$ $E_{пр} = \frac{2E_1E_2}{E_1+E_2}$ $R_з$ – радиус закругления | Анкерные опоры | –"– | УТИ |
| | 6   | $P = 0{,}59\sqrt[3]{\frac{NE_{пр}^2}{R_з d \sin\alpha}}$ $R_з$ – радиус закругления кромки отверстия | Сферические опоры, шаровые клапана | –"– | МАСТ-I УТИ |
| | 7   | $P = 0{,}918\sqrt[3]{\frac{N}{3d^2 K}}$ | Подшипники качения | –"– | МАСТ-I |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|
| Вал-втулка | 8  | $P=0{,}8\sqrt{\frac{N}{lk}\frac{D-d}{Dd}}$ | Подшипники скольжения, цилиндрические шарниры | Трибов ч В-I | СМЦ-2 УМТ-I |
| | 9  | $P=\frac{N\cdot 180}{\pi R\alpha l}$ | Вал-вкладыш | -"- | СМЦ-2 |
| | 10  | $P=0{,}8\sqrt{\frac{N}{lDk}}$ | Роликовые подшипники, цепные передачи | -"- | |
| Ролик по ролику | 11  | $P=0{,}8\sqrt{\frac{N}{lk}\frac{d_1+d_2}{d_1d_2}}$ | Зубчатые и фрикционные передачи | Трибовак Р | СМЦ-2 МИ-IМ |
| С возвратно-поступательным движением | 12  | $P=0{,}8\sqrt{\frac{N}{lk}\frac{\Delta}{(d+\Delta)d}}$ $\Delta$ – зазор | Поршни, плунжеры, штепсельные разъемы | Трибовак ВП-I | |
| | 13  | $P=\frac{4N}{\pi d^2}$ | Различные направляющие | -"- | МИТ-I |

При наличии покрытия контролируют не только его среднюю толщину, но и зависимость толщины по рабочей части образца.

2.3.2. Данные о материале образцов заносят в карту, где указывают его наименование, вид термообработки, вид и толщину покрытия.

2.3.3. Типовые формы и размеры образцов для испытаний на трение и изнашивание по настоящим рекомендациям приводятся в табл.3.

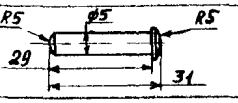
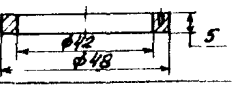
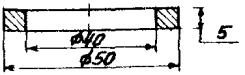
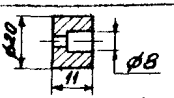
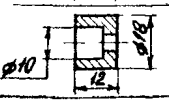
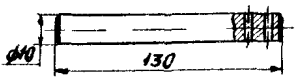
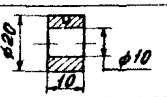
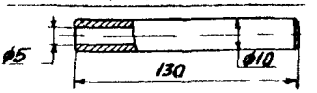
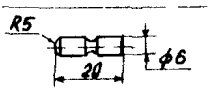
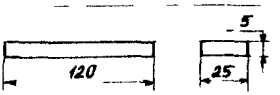
2.4. При испытаниях триботехнических характеристик материалов контролю и регистрации подлежат следующие параметры: нагрузка, температура испытаний, средняя температура поверхности трения, скорость скольжения, сила (момент) трения, путь трения (количество оборотов, циклов), давление в вакуумной камере, состав окружающей газовой среды (при необходимости), технический ресурс.

2.4.I. Номинальная нагрузка определяется расчетным путем из номинальной площади контакта трущихся образцов $A_a$(мм$^2$). Для этого выбирают номинальное давление приходящееся на единицу площади контакта $P_a$(Н/мм$^2$) = $\frac{N}{A_a}$, из условий испытаний и по нему находят значение нормальной нагрузки (см.прил.I и формулы табл.2). Величина номинальной нагрузки не должна отличаться от заданной более чем на 3%.

2.4.2. Контроль температуры испытаний рекомендуется осуществлять хромель-копелевыми термопарами (ГОСТ 3044-84), изготовленными из проволоки 0,2-0,3 мм с образованием сферической головки $\phi$ 0,5-0,8 мм, и обладающими наибольшей чувствительностью (0,0688 мв/град). Крепление головки в отверстии образца должно исключать ее относительное перемещение,

Таблица 3

Форма и размеры образцов для машин трения "Трибовак" (рекомендуемые)

| Тип машины трения | | Вид образца | |
|---|---|---|---|
| Трибовак Т-I | 1 |   | палец (индентор) |
| | 2 |   | кольцо I |
| | 3 |   | кольцо 2 |
| Трибовак Т-2 (Т) | 4 |   | кольцо |
| | 5 |   | контробразец |
| Трибовак В-I | 6 |   | вал |
| | 7 |   | втулка |
| Трибовак ВИ-I | 8 |   | вал |
| | 9 |   | полувтулка |
| | 10 |   | индентор |
| | 11 |   | пластина |

для чего термопару приваривают к контрообразцу, например конденсаторной сваркой.

Следует учитывать, что в условиях вакуума необходим надежный контакт термопары с телом образца.

Провода термопары должны быть изолированы материалом, температура разложения которого превышает предельно возможную по условиям испытаний. Непрерывность измерения температуры обеспечивается автоматическими самопишущими приборами, например КСП-4, ПСР и др., которые предварительно проверяют, термопары тарируют.

Замер средней объемной температуры образца - по показаниям трех датчиков при установившемся значении температуры перед началом испытаний. Точность измерения ± 3-5%.

2.4.3. Скорость скольжения устанавливается с учетом кинематики и геометрии узла трения. Ее величина должна отличаться от заданной не более, чем на 3%.

2.4.4. Износ контролируют средствами, выбранными с учетом ожидаемой его величины: измеряя высоту изношенного слоя (микрометром, оптиметром, профилографом, толщиномером и т.д.), методами искусственных баз и вырезания лунок, поверхностной активации (ГОСТ 23.209-79) и др.

Массовый износ устанавливают, взвешивая образцы до и после эксперимента на аналитических весах.

Оптимален вариант непрерывной регистрации износа как образца, так и контробразца. Если фиксируемый износ не превышает погрешности измерения используемого метода, то либо переходят на другой, более чувствительный метод, либо увеличивают продолжительность испытаний до наработки надежно регистрируемого износа. Точность измерений определяется параметрами измерительных устройств и должна быть не хуже ± 3%.

2.4.5. Сила трения измеряется с помощью тензометрической балки или другими известными средствами. Для этого на

упругую балку наклеивают тензодатчики, которые затем соединяют через усилитель тензостанции (например, "Топаз", УТ-4 и др.) с автоматическим самописцем, и тарируют.

Перед испытаниями рекомендуется убедиться, что один и тот же момент трения, регистрируемый при различных коэффициентах усиления, не отличается по абсолютной величине.

Точность измерений - не хуже ± 3%.

2.4.6. Путь трения - расстояние, проходимое точкой рабочей поверхности по контртелу. В зависимости от конструкции реального узла трения и кинематики движения точки поверхности трения сопряженных элементов могут находиться во фрикционном контакте постоянно или периодически. Следует различать, к какому из элементов относится рассчитываемый путь трения.

Методика определения путей трущихся деталей дана в прил. 2.

2.4.7. Давление в вакуумной камере и состав газовой среды измеряют с помощью стандартных вакуумметров и газоанализаторов со стандартными датчиками. Точность контроля определяется параметрами измерительных устройств.

2.4.8. Испытания на долговечность (технический ресурс) характеризуют износостойкость поверхностных слоев материала (твердые смазки, защитные покрытия, поверхностная термо- и механообработка). При сравнительных испытаниях устанавливается базовый показатель для различных материалов по пути трения, продолжительности, числу циклов взаимодействия.

## 2.5. Особенности испытаний триботехнических свойств материалов в вакууме

2.5.1. Установка для испытаний триботехнических характеристик материалов в вакууме серии "Трибовак" представлена на рис. 1. Она включает четыре основных узла: I - стандартный вакуумный агрегат (ЭРА-300), II - вакуумный вентиль,

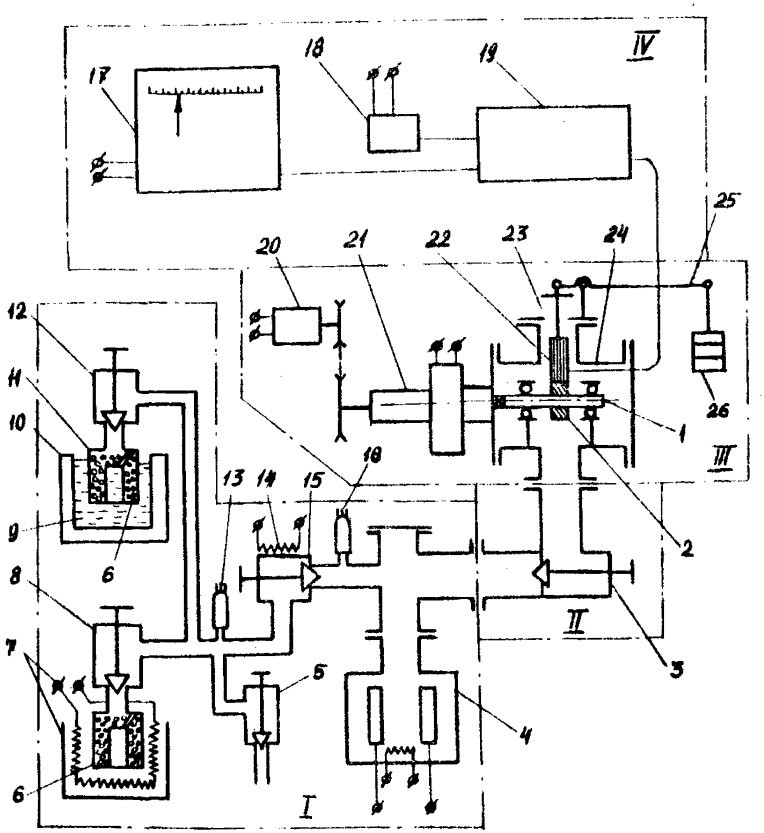



Рис. I Типовая схема установки серии "Трибовак":
I - вакуумный агрегат; II - отсечной вакуумный вентиль; III - камера трения с приводом; IУ - измерительные приборы; 1 - подвижной образец; 2 -неподвижный образец; 3 - вентиль ДУ-100; 4 - электроразрядный насос; 5 - вентиль ДУ-20; 6 - цеолитовый насос; 7 - нагреватель цеолитового насоса; 8 - вентиль ДУ-32; 9 - жидкий азот; I0 - сосуд Дьюара; II - цеолитовый насос; I2 - вентиль ДУ-32; I3 - датчик давления ПМТ-2; I4 - нагреватель вентиля; I5 - вентиль ДУ-32; I6 - датчики давления ПМТ-2 и ПМИ-2; I7 - прибор, регистрирующий силу трения; I8 - блок питания тензометрического усилителя; I9 - тензометрический усилитель; 20 - привод вращения образца; 2I - муфта ввода вращения; 22 - НИУ - нагрузочно-измерительное устройство; 23 - сильфон; 24 - камера трения; 25 - рычаг нагрузки на образцы; 26 - груз

отсекающий машину трения от системы вакуумной откачки; Ш - машина трения с вакуумной камерой; IУ - контрольно-регистрирующая аппаратура.

Машина трения состоит из узла трения, привода вращения образцов нагрузочно-измерительного устройства и датчиков первичной информации. Все элементы монтируются в типовой высоковакуумной камере объемом 10-20 л., пристыкованной к блоку создания вакуума и газовых сред. В зависимости от типа узла трения установка получает название Трибовак Т, Трибовак В, Трибовак ВП и т.д.

2.5.2. Основное требование, обеспечивающее точность и воспроизводимость результатов при измерении малых давлений - правильный выбор датчика, его месторасположения и ориентации ее по отношению к объекту испытаний.

Для измерения низкого и среднего вакуума заборная часть датчика должна находиться непосредственно в рабочем объеме вакуумной камеры установки, место расположения и ориентация датчика к системе объект - стенка не регламентируются.

При измерении высокого и сверхвысокого вакуума датчик ориентируют в сторону, противоположную узлу трения (на стенку вакуумной камеры), и защищают от прямого попадания на него молекулярных потоков от узла трения.

## 3. МЕТОД ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ И ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

Метод относится к лабораторным испытаниям первой категории (эталонные испытания) и служит для сравнительной оценки материалов и покрытий, контроля стабильности их триботехнических свойств, получения исходных данных для триботехнических расчетов и др.

Сущность метода: к образцу - плоскому кольцу из исследуемого материала (либо покрытия на нем) прижимают с помощью груза три полусферических индентора - контробразца с постоянной нагрузкой. Кольцо вращают относительно инденторов с постоянной скоростью скольжения и определяют коэффициент трения и интенсивность их изнашивания. Температура испытаний 293±5 К.

3.I. Схема и условия испытаний. Испытания проводят по пальчиковой или торцевой схемам, что позволяет получить два предельных случая для коэффициента взаимного перекрытия $K_{вз}$.

Окружающая среда - вакуум или атмосфера согласно заданным условиям. При вакуумных испытаниях давление среды $\leq 10^{-4}$Па. Нагрузки: по пальчиковой схеме - 2,5Н, торцевой - 7,5Н. Скорость скольжения образцов I м/с. Температура нормальная (293К). Время испытаний 3600 с или пока коэффициент трения не достигнет заданного значения (например 0,4 ).

3.2. Образцы для испытаний. По пальчиковой схеме: палец - диам. 5 мм, высотой 3I (или шар Ø 8 мм из Ст. 95х18) - (см.табл.2, поз. I). По торцевой схеме: первый образец - кольцо с внешним диаметром 5 мм, внутренним - 40 мм; второй образец - кольцо с внешним диаметром 48 мм, внутренним - 42 мм, толщина образцов - 5 мм (табл. I, поз. 2,3).

Уменьшение одного из образцов, работающего по торцевой схеме, может быть вызвано необходимостью, с одной стороны, полного перекрытия трущихся поверхностей, а с другой, измерения износа таким же методом, как и по пальчиковой схеме, т.е. с использованием профилометра-профилографа.

3.3. Применяемое оборудование. Испытания проводят на стенде "Трибовак-Т" (рис. 2 ). Узел трения, расположенный на нижнем фланце (I2) вакуумной камеры (4), состоит из магнитной муфты (I6), на которой закреплен нижний (подвижной) образец-кольцо (I). Три пальчиковых образца-индентора (18) вставлены в отверстия державки (7). На каждом инденторе груз (6) массой 250 гр. Державка на подшипниках может колебаться на оси (8) в полом валу муфты (I6). Момент трения измеряют с помощью тензометрической балки (I0) (с наклеенными датчиками), установленной на нижнем фланце (I2), при ее деформации вследствие поворота державки (7). Такая схема позволяет создавать постоянную нагрузку на пару трения (2,5Н на каждый индентор по пальчиковой схеме, 7,5Н - по торцевой) и кроме того компенсирует неточности при изготовлении, что способствует самоустановке верхнего образца относительно нижнего. Возможен переход к другой схеме путем замены подвижного и неподвижного образцов.

Сила трения между образцами при их фрикционном контакте измеряется серийной тензометрической аппаратурой "Топаз", 8АНЧ-7м, УТ-4 и др. , регистрируется самопишущим потенциометром КСП-4 или др. .

Износ твердосмазочного покрытия определяется путем снятия профилограмм дорожки трения оптиметром или профилометром-профилографом (например "Калибр-252").

Износ индентора и образцов торцевой схемы контролируется линейными и весовыми измерениями (см.2.4.4).

Измерение вакуума - с помощью стандартных вакуумметров.

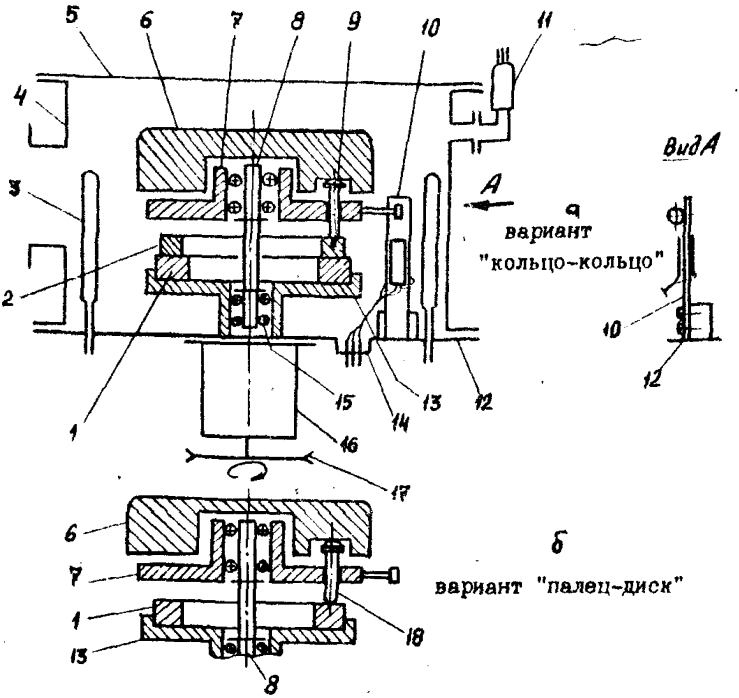



Рис. 2 . Схема камеры трения и нагрузочно-измерительного устройства:

1 - подвижный образец - кольцо, 2- верхний образец - кольцо, 3 - экран, 4 - вакуумная камера трения, 5 - верхний фланец, 6 - груз нагрузки, 7 - державка, 8 - ось, 9 - штифт, 10 - тензобалка, 11 - датчики давления ДМТ-2 и ДМИ-2: 12 - нижний фланец, 13 - полый вал - столик, 14 - термоввод, 15 - подшипники, 16 - магнитная муфта, 17 - шкив, 18 - неподвижный образец - индентор

3.4. Проведение испытаний

3.4.1. Перед началом испытаний производят градуировку тензометрической аппаратуры (прил. 3).

3.4.2. Проверяют соответствие образцов технической документации. Поверхность металлических образцов промывают бензином (ГОСТ 443-76), затем этиловым спиртом (ГОСТ 5962-67) и просушивают на воздухе.

Примечание.1.Образцы с твердосмазочным покрытием и из пластмасс не промывать !

2. Все операции с образцами проводят, используя пинцет, поверхности захвата которого должны быть промыты растворителями (см. п.3.4.2. ).

3.4.3. Измеряют линейные и весовые характеристики образцов (см.2.4.4).

3.4.4. Устанавливают образцы в камере: образец-кольцо - на нижней державке; цилиндрические (инденторы) - в отверстии верхней державки и на них закрепляют грузы. При торцевой схеме вместо инденторов устанавливают образец-кольцо.

Создавая нагрузку 2,5Н на каждый индентор по пальчиковой схеме или 7,5Н на образец-кольцо по торцевой, осуществляют контакт образцов. Затем включают электродвигатель и через магнитную муфту передают вращение на нижний образец со скоростью 1 м/с. Убедившись в нормальной работе узла трения, уплотняют камеру и производят откачку или создают в ней газовую среду.

Откачивают камеру поэтапно: сначала цеолитовым до $5.10^{-1}$Па, затем магниторазрядным насосами и азотным экраном до величины $\leqslant 10^{-5}$ Па.

Давление газовой среды устанавливают согласно техническим требованиям.

3.4.4. Получив в камере трения заданные условия окружающей среды, включают привод вращения образца. Возникающая

при этом сила трения $F$ испытуемой пары регистрируется самопишущим потенциометром, установленном на выходе тензометрического усилителя. Время приработки фиксируется в процессе испытаний по достижению постоянной величины коэффициента трения.

Время испытаний 3600 с $\pm$ I%. Величину силы трения через каждые 600 с заносят в рабочую тетрадь. Разница незначительна, определяют ее среднее значение $F_{cp} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} F_i$, где $n$ - число измерений. Если изменение силы трения не наблюдалось в пределах $F \geq 20\%$, отмечают максимальные и минимальные ее значения $F_{max}$ и $F_{min}$.

3.4.5. По окончании испытаний образцы извлекают из камеры трения, очищают от продуктов износа мягкой волосяной кисточкой и струей воздуха из резиновой груши, затем взвешивают и обмеривают для определения износа.

3.5. Обработка результатов испытаний

3.5.I. Величину коэффициента трения определяют по формуле:

$$f_{cp} = \frac{F_{cp}}{N},$$

где $F$ - сила трения, Н; $N = 2,5$ для пальчиковой и $N = 7,5$ для торцевой схемы.

При необходимости рассчитывают значения $f_{min}$ и $f_{max}$.

3.5.2. Для определения износа:

а) установить образец, прошедший испытания, на предметном столике профилографа-профилометра;

б) включить профилограф-профилометр согласно инструкции по его эксплуатации;

в) снять профилограмму дорожки трения в четырех местах по двум взаимно-перпендикулярным положениям образца;

г) измерить площадь профилограмм по числу свободных квадратов внутри полученной эпюры;

д) повторить пп.а,б,в,г при испытании других образцов. массовый износ $W_m$, кг рассчитывается по формуле:

$$W_m = \frac{A_n}{k_1 k_2} \rho \pi d_{mp},$$

где $A_n$ – площадь поперечного сечения дорожки, полученная по результатам измерений, $м^2$; $K_1$, $K_2$ – коэффициенты вертикального и горизонтального увеличения масштаба; $\rho$ – плотность материала образца, $кг/м^3$; $d_{тр}$ – диаметр дорожки трения, м.

Линейный износ $W_L$ определяют по высоте изношенного слоя на профилограммах.

3.5.3. Интенсивность изнашивания

$$I = \frac{W_L}{L},$$

где $L$ – путь трения, м (см. прил. 2).

3.5.4. Окончательные результаты испытаний оформляются протоколом (см. прил. 9).

## 4. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ И ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ ПО СХЕМЕ ВАЛ-ВТУЛКА ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

4.1. Метод предназначен для испытания цилиндрических подшипников скольжения в атмосфере и вакууме при температурах 290...600К.

Сущность метода: к образцу-валу прижимается втулка радиальной постоянной нагрузкой; вал вращается относительно втулки с заданной скоростью скольжения.

4.2. Образцы для испытаний: вращающийся – вал, неподвижный – втулка. Их размеры – согласно табл.2, поз. 6; 7.

Требования к образцам должны соответствовать техническим условиям на детали и натурного узла трения. При отсутствии подобных ТУ – по п. 2.3.

В одном режиме от партии материала испытаниям подвергают не менее пяти одинаковых по форме и размерам образцов.

4.3. Регистрируемые параметры: нагрузка, скорость, температура испытаний и поверхности трения, сила (момент) трения, износ (линейный, весовой), давление в испытательной камере, состав газовой среды (при необходимости).

Контроль параметров проводят с учетом рекомендаций пп.2.4 и 5.5.

4.4. Режим испытаний должен имитировать контактные, кинематические и тепловые условия работы натурного узла трения. Критерием при этом служит произведение среднего контактного давления на скорость скольжения $PV$, наиболее близкое к натурному.

Среднее контактное давление вычисляют по формуле

$$P_a = \frac{N}{A_a},$$

где $N$ - радиальная нагрузка; $A_a = dl$ - площадь диаметрального сечения,

где $d$ - номинальный диаметр подшипника, $l$ - длина втулки.

4.5. Применяемое оборудование. Испытания проводят на стенде "Триовак В-1" (рис. 1), который состоит из высоковакуумного откачного агрегата ЭРА-300-2 (I), высоковакуумного вентиля ДУ-100 (II), камеры трения и нагрузочно-измерительного устройства (НИУ) (Ш) и приборной стойки (IУ).

4.5.I. Схема камеры трения и нагрузочного устройства для работы в диапазоне температур 300...600К представлена на рис. 3.

Испытуемые образцы - вал (I) и втулку (2) располагают на подшипниках качения (5) соответственно в опорах (4) и обойме (I4) нагрузочно-измерительного устройства. Втулка закрепляется винтом (3). Обойма (I4) и коромысло (I6) с наклеенными тензодатчиками соединены тягами (I5), образуя параллелограммный механизм, устанавливаемый на опорную призму штока нагрузки (9). Шток соединен с рычагом (II), на котором подвешивают груз (I2). На штоке закреплена тензопластина (I7), входящая другим концом в паз обоймы (I4).

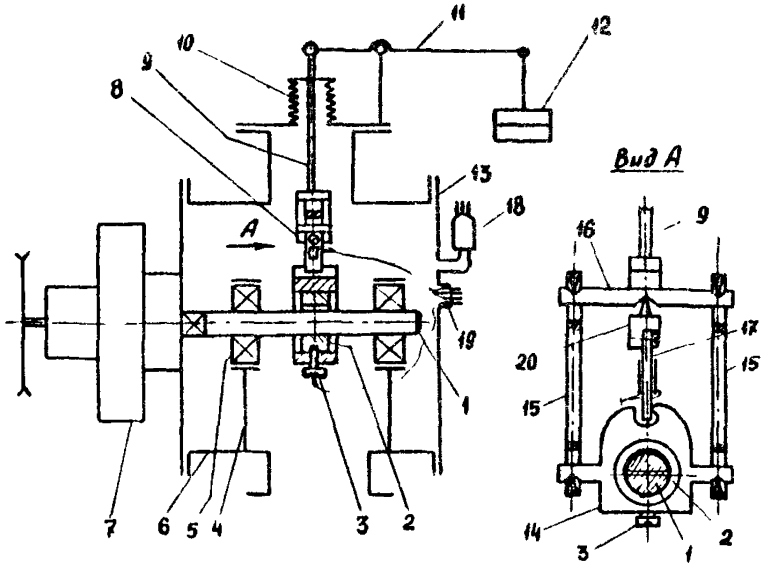



Рис. 3. Схема камеры трения и нагрузочно-измерительного устройства (НИУ) для работы в диапазоне температур 300...600К:
1 - подвижный образец - вал, 2 - неподвижный образец - втулка, 3 - винт крепления втулки в обойме, 4 - опора вала, 5 - подшипники вала, 6 - камера трения, 7 - электромагнитная муфта ввода вращения в камеру трения, 8 - НИУ, 9 - шток нагрузки, 10 - сильфон передачи нагрузки в камеру трения, 11 - рычаг нагрузки, 12 - грузы нагрузки, 13 - фланец камеры трения, 14 - обойма образца-втулки,, 15 - тяги параллелограммного механизма, 16 - коромысло, 17 - тензобалка, 18 - датчики давления ПМТ-2 и ПМИ-2, 19 - гермоввод

Образцы, нагрузочно-измерительное устройство размещены в герметичной камере (6), к которой подстыкована электромагнитная муфта (7). Подвижный образец (I) соединен с валом муфты.

Нагрузочно-измерительное устройство работает таким образом. При подвешивании грузов (I2) через рычаг (II), сильфон (I0), шток (9), коромысло (I6), тяги (I5) подтягивается обойма (I4), а следовательно, и втулка (2) на валу (I). Вследствие трения между валом и втулкой при включении привода и муфты (7) последняя вместе с обоймой (I4) поворачивается на некоторый угол и отклоняет тензопластину (I7) пропорционально моменту трения. Сигналы момента трения от тензодатчиков поступают на тензопреобразователь и регистрирующий прибор.

Провода от тензодатчиков, термопар и нагревателя выводятся из камеры через гермовводы (I9).

Давление в камере измеряется датчиками ПМТ-2 и ПМИ-2 (I8), расположенными на фланце (I3) и соединенными кабелем с вакуумметром ВИТ-2.

Для преобразования и усиления сигналов момента трения применяется стандартная тензоаппаратура. Регистрируются эти сигналы электронным пищущим прибором типа КСП-4.

Износ вала и втулки определяется измерением линейных и весовых параметров (см.2.4.4).

4.5.2. Схема камеры трения и нагрузочно-измерительного устройства для работы при температурах выше 600К представлена на рис. 4 .

Испытуемые образцы - вал (I) и втулка (2) (подшипник) охватываются гибкой лентой (20), закрепленной на втулке винтом (3). Проволочными крючками (I9) лента соединяется с двумя тензобалками (I8), на которые наклеены тензодатчики (I7). Тензобалки (I8) прикреплены к сухарю (I6) винтами. Сухарь соединен со стержнем (9), который герметично соединен с сильфоном (I0) и рычагом нагрузки (II). Рычаг соединен со штангой нагрузки (I2).

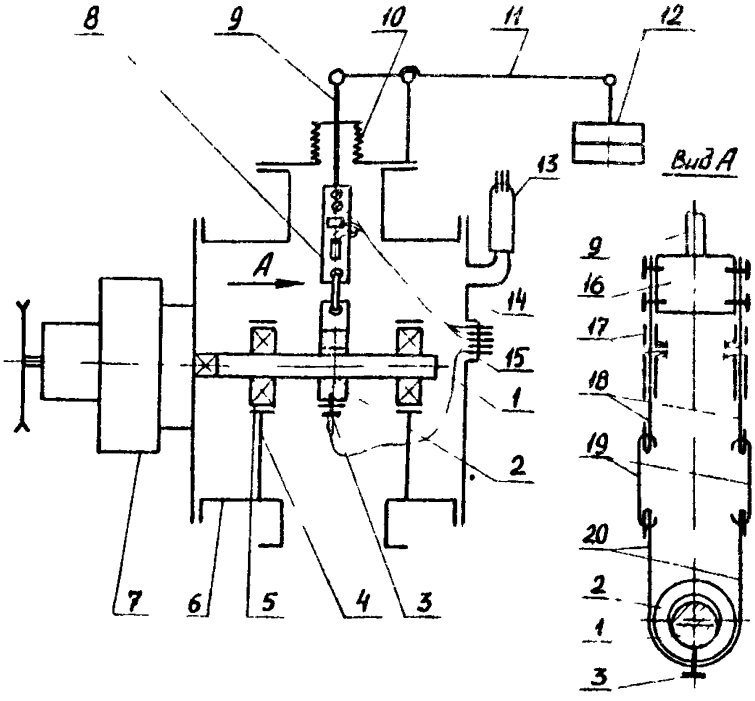



Рис. 4. Схема камеры трения и нагрузочно-измерительного устройства для работы при температурах выше 600 К:

I - подвижный образец - вал, 2 - неподвижный образец - втулка; 3 - винт крепления втулки к ленте; 4 - опоры вала; 5 - подшипники опоры вала; 6 - камера трения; 7 - электромагнитная муфта ввода вращения в камеру трения; 8 - НИУ; 9 - шток; I0 - сильфон; II - рычаг нагрузки; I2- грузы нагрузки; I3 - датчики давления ПиТ-2 и ПМИ-2, I4 - фланец; I5 - гермоввод; I6 - сухарь; I7 - тензодатчики; I9 - тензопластины; I9 - подвесы; 20 - лента

Образец вал (I) расположен на подшипниках качения (5) в опорах (4).

Образцы и нагрузочно-измерительное устройство размещены в камере трения (6), к которой подстыкована электромагнитная муфта (7). Вал муфты соединен с валом (I). Образцы заменяются через большой съемный фланец (I4). Камера трения через высоковакуумный вентиль ДУ-I00 подсоединяется к откачному агрегату.

Нагрузочно-измерительное устройство работает следующим образом. Нагрузка с помощью груза (I2) передается через рычаг (II), стержень (9), сухарь (6), тензобалки (I7), крючки (I9) на огибающую ленту (20) и втулку с валом. При включении привода и электромагнитной муфты возникает момент трения, вызывающий разное натяжение на концах ленты (20), а следовательно, разную деформацию на тензопластинах (I8). Величина момента трения регистрируется тензопластинами (I8) с наклеенными тензодатчиками (I7).

4.6. Проведение испытаний

4.6.I. Подготовка образцов: измеряют диаметр вала и втулки (внутренний), чистоту и твердость поверхностей, толщину антифрикционного покрытия.

На контактирующих поверхностях не должно быть раковин, сколов, заусениц и других дефектов, видимых невооруженным глазом, а при наличии антифрикционных покрытий – отслоений, вспучиваний, повреждений и неравномерности толщины.

Результаты измерений и марки материалов регистрируют в журнале испытаний.

Затем образцы протирают сначала бензином (ГОСТ 443-76), потом этиловым спиртом (ГОСТ 5962-67) и просушивают на воздухе. Для протирки используют бязь.

Примечание. Образцы с твердосмазочным покрытием в растворителях не промывать

Взвешивают образцы на аналитических весах АДВ-200М. Результаты также заносят в журнал.

4.6.2. Производят градуировку нагрузочно-измерительного устройства (прил. 4).

4.6.3. Устанавливают образцы в камеру трения (перекос, повреждение поверхностей не допускаются).

4.6.4. Создают в камере трения условия испытаний по программе (вакуум, газовая среда, температура).

При вакуумных испытаниях откачку камеры производят поэтапно: сначала цеолитовым насосом до $5.10^{-2}$Па, затем магниторазрядным насосом и азотным экраном до величины $\leqslant 10^{-5}$Па.

4.6.5. Подготавливают тензоаппаратуру, электронный пишущий прибор и включают их на прогрев в течение 20 минут.

4.6.6. Получив в камере трения заданные условия окружающей среды, нагружают образцы. Включают нагреватель и устанавливают температуру испытаний.

4.6.7. Включают привод и постепенно доводят скорость до необходимой величины (порядок пуска можно при необходимости изменить: сначала включается привод, затем плавно устанавливается нагрузка).

4.6.8. В процессе испытаний фиксируются: коэффициент (момент) трения, температура поверхности трения, частота вращения, нагрузка, давление окружающей среды (при необходимости парциальное давление газов). Результаты заносят в журнал.

Измерение и запись силы (момента) и температуры поверхности трения производят согласно программе испытаний.

4.6.9. Продолжительность испытания определяется временем эксплуатации натурного узла по ТУ или моментом выхода из строя вследствие необратимого увеличения момента трения.

4.6.10. По окончании испытаний образцы извлекают из камеры, очищают от продуктов износа легкой волосяной щеточкой и струей воздуха из резиновой груши, взвешивают и обмеривают. Все данные заносят в журнал.

При испытании пар трения с твердосмазочными покрытиями их износ контролируется с помощью прибора "Измеритель толщины ИТ-I" (прил. 7) или другими (см.п.2.4) средствами.

4.7. Обработка результатов.

4.7.I. Коэффициент трения $f$ вычисляют по формуле $f=k\cdot z$, где К - градуировочный масштаб шкалы регистрирующего прибора ($\frac{I}{дел}$); z - число делений на нем, соответствующее измеряемому коэффициенту трения, дел.

4.7.2. Массовый износ вала по формуле $W_m = W_{m1} - W_{m2}$, где $W_{m1}$ и $W_{m2}$ - массы вала до и после испытаний, г.

Массовый износ втулки: $W'_m = W'_{m1} - W'_{m2}$,
где $W'_{m1}$ и $W'_{m2}$ - массы втулки до и после испытаний, г.

Массовую интенсивность изнашивания вала и втулки определяют по выражениям

$$I_в = \frac{W_m}{L_в}, \qquad I_{вт} = \frac{W'_m}{L_{вт}} \quad (\frac{г}{м}),$$

где $L$ - путь трения скольжения соответственно вала и втулки за время работы $t$, определяемый по методике прил. 2.

4.7.3. Линейный износ вала

$$W_l = \frac{d_{в1} - d_{в2}}{2},$$

где $d_{в1}$ и $d_{в2}$ - диаметры вала до и после испытаний в месте износа, мм.

Линейный износ втулки $W'_l = \frac{d_{вт1} - d_{вт2}}{2}$,

где $d_{вт1}$ и $d_{вт2}$ - диаметр втулки до и после испытаний, мм.

Среднюю линейную интенсивность изнашивания вала и втулки находят по формулам:

$$I_{cp} = \frac{W_i}{L_a}, \qquad I'_{cp} = \frac{W'}{L_a},$$

где $L$ – путь трения скольжения вала и втулки за время работы $t$ мин, вычисляемый по методике прил. 2, $W_i$, $W'_i$ – соответственно максимальные линейные износы, мкм.

При наличии на вале тонкослойного смазочного покрытия определяют толщину покрытия в мкм; $t$ – время полного износа покрытия.

4.7.4. Технический ресурс подшипника скольжения

$$R = \frac{|\xi| - \varepsilon}{(I_{i1}L_1 + I_{i2}L_2)n},$$

где:

$|\xi|$ – допустимое смещение вала в направлении действия нагрузки, мм;

$\varepsilon$ – радиальный зазор, мм;

$I_{i1}, I_{i2}$ – интенсивность линейного изнашивания материалов неподвижного и подвижного элементов узла трения;

$L_1, L_2$ – пути трения скольжения точек рабочих поверхностей неподвижного и подвижного элементов, мм;

$n$ – число циклов в минуту.

Для пары вал-втулка сухого трения ввиду того, что износу в основном подвержен твердый смазочный материал, ресурс работы ограничивается временем износа этого покрытия толщиной $h$ и формула упрощается: $R = \frac{h}{I_i L_i n}$,

где $I_i$ и $L_i$ – соответственно интенсивность изнашивания и путь трения для точки поверхности, на которую нанесено антифрикционное покрытие.

Если покрытие нанесено на вращающийся образец (вал), ресурс рассчитывается по формуле

$$R = \frac{\pi}{\varphi}\frac{h}{I_2 V},$$

где $V$ – скорость скольжения, мм/мин.

Когда покрытие нанесено на втулку $R = \frac{h}{I_1 V}$.

4.7.5. По результатам испытаний оформляют протокол испытаний (прил. 9).

## 5. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ И ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ ПО ТОРЦЕВОЙ СХЕМЕ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

5.1. Метод предназначен для испытания материалов и покрытий, применяемых в подпятниках, подшипниках скольжения и др. узлов в атмосфере и вакууме при температурах 300...600К. Состоит в определении коэффициента трения и износостойкости материалов при торцевом контакте под нагрузкой цилиндрических кольцевых образцов, один из которых вращается с заданной скоростью, другой- неподвижный - контробразец (см.табл.2, поз. 4, 5).

Испытания проводятся на стенде "Трибовак Т-2".

5.2. Требования к образцам должны соответствовать техническим условиям на детали натурного узла трения. При отсутствии подобных ТУ - по п. 2.3.

В одном режиме от партии материала испытаниям подвергают не менее пяти образцов, одинаковых по форме и размерам.

5.3. Регистрируемые параметры: нагрузка, скорость, температура испытаний и в зоне (у поверхности) трения, сила трения (момент трения), износ (линейный, весовой), давление в испытательной камере, состав газовой среды (при необходимости).

Контроль параметров проводится с учетом рекомендаций пп. 2.4 и 5.5.

5.4. Режим испытаний должен имитировать контактные, кинематические и тепловые условия работы натурного узла трения. Критерием при этом служит произведение среднего контактного давления на скорость скольжения $pv$, наиболее близкое к натурному.

Применяемое оборудование. Испытания проводят на стенде "Трибовак Т-2", который состоит из высоковакуумного откачного агрегата ЭРА-300-2, высоковакуумного вентиля ДУ-100, камеры трения с нагрузочно-измерительным устройством и приборной стойки. Схема камеры трения и нагрузочно-измерительн-

ного устройства для испытаний по торцевой схеме представлена на рис. 5 . Испытуемые образцы - кольцо (I) и контробразец (2) расположены в камере (3). Кольцо опирается на шарикоподшипниковый узел (I6) и приводится во вращение через электромагнитную муфту (I7) электроприводом. Контробразец (2) закреплен винтом на штоке (I5).

Нагрузка между контробразцом и кольцом создается штоком (I5), расположенном в опоре (5). У штока имеется чашка (6), в радиальные прорези которой вставлена тензобалка (7), входящая центральной частью в прорези толкателя (I2), расположенного во фланце (8) камеры (3). Толкатель герметично соединен с фланцем сильфоном (9). Нагрузка на него передается с помощью рычажного механизма (I0) грузами (II). На тензобалку наклеены тензодатчики (I4) для замера сил трения между образцами. На фланце камеры размещены гермовывод (I3) для вывода из камеры проводов тензодатчиков, термопары и нагревателя образцов, а также датчики давления (4) ПиТ-2 и ПМ-2. Камера через вентиль ДУ-I00 подстыковывается к откачному агрегату ЭРА-300-2.

Для преобразования и усиления сигналов с тензодатчиков, наклеенных на тензобалку нагрузочно-измерительного устройства, применяется стандартная тензоаппаратура ("Топаз", 8АНЧ-7м, УТ-4 и др.).

5.5. Проведение испытаний.

5.5.I. Проверяют соответствие образцов технической документации: измеряют их диаметры, высоту, чистоту и твердость трущихся (торцевых) поверхностей, толщину антифрикционного покрытия.

На контактирующих поверхностях не должно быть раковин, сколов, заусениц и других дефектов, видимых невооруженным глазом, а при наличии антифрикционных покрытий - отслоений, вспучиваний, повреждений и неравномерности толщины.

Результаты измерений с указанием марок материалов и покрытий регистрируют в журнале испытаний.

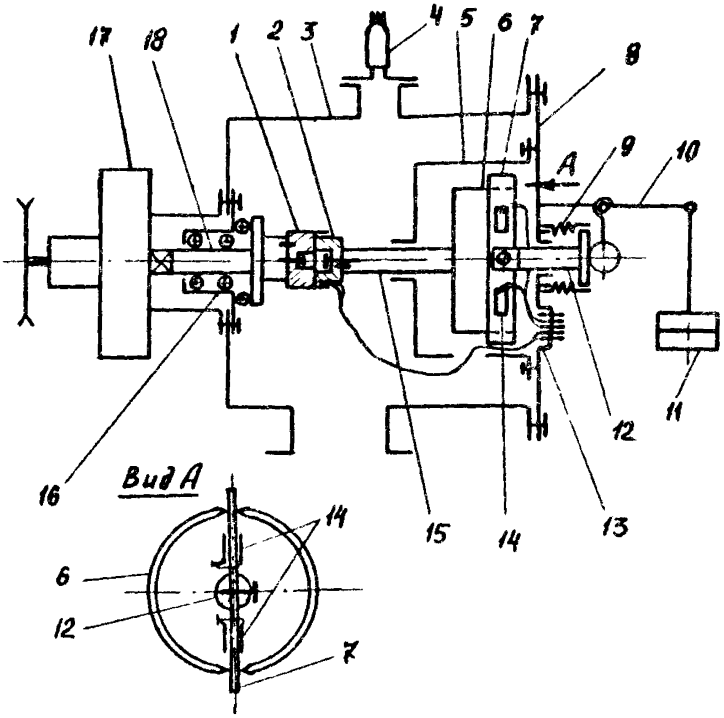



Рис. 5. Схема камеры трения и нагрузочно-измерительного устройства

I - подвижный, 2 - неподвижный образцы; 3 - камера трения; 4 - датчики давления ПиТ-2 и ПМИ-2; 5 - кожух; 6 - чашка; 7 - тензопластина; 8 - фланец; 9 - сильфон; I0 - рычаг; II - груз; I2 - толкатель; I3 - гермоввод; I5 - шток; I6 - опора; I7 - муфта электромагнитная; I8 - вал

5.5.2. Металлические образцы тщательно промывают бензином (ГОСТ 443-76), затем этиловым спиртом (ГОСТ 5962-67) и просушивают на воздухе. Для протирки используют вазь.

Примечание. Образцы из пластмасс и с твердосмазочными покрытиями типа ВНИИНП-209, -212, -213, -230 и т.д. растворителями не промывать!

5.5.3. Взвешивают образцы на аналитических весах ВЛР-200М. Результаты заносят в журнал.

5.5.4. Производят градуировку нагрузочно-измерительного устройства (прил. 5).

5.5.5. Устанавливают испытуемые образцы в камере трения (перекос, повреждение поверхностей не допускаются).

5.5.6. Убедившись в нормальной работе узла трения, уплотняют камеру и производят откачку или создают условия окружающей газовой среды согласно программе испытаний.

Откачивают камеру поэтапно: сначала цеолитовым насосом до $5.10^{-2}$Па, затем магниторазрядным насосом и азотным экраном до величины $\leqslant 10^{-5}$Па. Давление газовой среды устанавливают по техническим требованиям.

5.5.7. Получив в камере трения заданные условия окружающей среды, включают тензоаппаратуру и регистрирующий прибор для прогрева на 20 минут.

5.5.8. Нагружают образцы, обеспечивая нормальную нагрузку и контактное давление. Включают нагреватель и устанавливают необходимую температуру испытаний.

5.5.9. Включают привод и через электромагнитную муфту плавно доводят скорость до нужной величины.

5.5.10. Регистрируемые параметры: коэффициент трения, температура торцевых поверхностей, частота вращения, нагрузка, давление окружающей среды.

Измерение и запись коэффициента трения, температуры на границе контакта производят периодически согласно программе испытаний.

5.5.II. Продолжительность испытания определяется временем эксплуатации по ТУ натурного узла или моментом выхода из строя вследствие необратимого увеличения коэффициента трения и температуры в зоне трения или заедания в трущейся паре.

5.5.12. По окончании испытаний образцы извлекают из камеры трения, очищают от продуктов износа мягкой волосяной кисточкой и струей воздуха из резиновой груши, затем взвешивают и обмеривают. Все данные заносят в журнал.

При испытании пар трения с твердосмазочными покрытиями на износ контролируют с помощью прибора "Измеритель толщины ИТ-I" (прил. 7) или другими (см.п.2.4) средствами.

5.6. Обработка результатов

5.6.I. Коэффициент трения вычисляют по формуле

$$f = \frac{kz}{Nr_т},$$

где $k$ - градуировочный масштаб шкалы прибора (КСП-4);
$z$ - число делений на нем, соответствующее измеряемому моменту трения, дел., $N$-нормальная нагрузка на образцах, Н;
$r_т$ - радиус трения пары, см.

$N = aQ$ при атмосферных испытаниях; $N = aQ + P_с$ при вакуумных испытаниях, где $a$ - соотношение плеч рычажного механизма нагрузки; $Q$ - вес подвешиваемого груза, Н;
$P_с$ - сила, действующая на образец через сильфон, Н.

$$r_т = \frac{d_{вн} + d_{вш}}{4},$$

где $d_{вн}$ и $d_{вш}$ - соответственно внутренний и внешний диаметры образца кольца, м.

5.6.2. Линейный износ кольца определяют из выражения:

$$W_l^{ш} = h_1^{ш} - h_2^{ш},$$

где $h_{1ш}$ и $h_{2ш}$ - высота кольца до и после испытаний, м

5.6.3. Линейный износ контробразца

$$W_l^{ст} = h_1^{ст} - h_2^{ст},$$

где $h_1^{ст}$ и $h_2^{ст}$ – высота контробразца до и после испытаний, мкм

5.6.4. массовый износ кольца $W_m = W_{m1} - W_{m2}$,

где $W_{m1}$ и $W_{m2}$ – масса кольца до и после испытаний, г

5.6.5. массовый износ контробразца $W_m' = W_{m1}' - W_{m2}'$,

где $W_{m1}'$ и $W_{m2}'$ – масса контробразца до и после испытаний, г.

5.6.6. Массовая интенсивность изнашивания

$$I_м = \frac{W_m}{L_м}, \quad I_{ст} = \frac{W_m'}{L_{ст}},$$

где $L$ – путь трения скольжения пары трения, м вычисляют по формуле:

$$L = 2\pi r_т n t 10^2, \text{ м},$$

где $n$ – частота вращения подвижного образца, кольца, об/мин;

$t$ – время испытаний образцов, мин; $r_т$ – радиус трения пары трения, см.

5.6.7. Интенсивность (линейная) изнашивания деталей пар трения:

$$I_l = \frac{W_l}{L},$$

где $W_l$ – изменение их высоты (толщины антифрикционного покрытия), мкм; $L$ – путь трения, м.

5.6.8. Линейный износ, интенсивность изнашивания пар трения измеряют по высоте деталей с помощью профилографа-профилометра или толщиномера ИТ-I (прил. 7).

5.6.9. Окончательные результаты испытаний оформляются протоколом (прил. 9).

## 6. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ И ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ ПО СХЕМЕ ВАЛ-ВТУЛКА ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

6.I. Назначение метода. Метод предназначен для испытаний материалов и покрытий, применяемых в направляющих, плунжер-

ных, золотниковых и других парах в атмосфере и вакууме при температурах 300...600К.

Сущность метода: испытуемый подшипник (втулка, полувтулка) с валом нагружают радиальной нагрузкой, обуславливающей износ как втулки, так и вала при возвратно-поступательном движении последнего.

6.2. Применяемая для испытаний установка "Трибовак ВП-I" позволяет использовать образцы разной конфигурации и с различными коэффициентами взаимного перекрытия рабочих поверхностей трения:

6.2.I. Неподвижные образцы: индентор, полувтулка, движущиеся возвратно-поступательно: вал, пластина (табл.2, поз.8, 9,I0,II).

6.2.2. Требования к образцам должны соответствовать техническим условиям на детали натурного узла трения. При отсутствии подобных ГУ - по п. 2.3.

6.2.3. При одном режиме испытаний от партии материала подвергают испытанию не менее пяти образцов, одинаковых по форме и размерам.

6.3. Регистрируемые параметры: нагрузка, скорость, температура, сила трения, износ (линейный, весовой), давление в испытательной камере, состав газовой среды (при необходимости).

Контроль регистрируемых параметров осуществляют согласно рекомендаций пп.2.4 и 6.5.

6.4. Режим испытаний должен имитировать контактные, кинематические и тепловые условия работы натурного узла трения. При этом критерием служит произведение среднего давления на скорость скольжения $pV$, наиболее близкое к натурному. Среднее контактное давление вычисляют по формуле

$$p_a = \frac{N}{A_a},$$

где $N$ - радиальная нагрузка; $A_a$ - площадь диаметрального сечения. $A_a = dl$, где $d$ - номинальный диаметр втулки (полувтулки); $l$ - длина втулки (полувтулки).

Окружающая среда – вакуум, атмосфера или газовая среда в зависимости от условий эксплуатации материала.

6.5. Применяемое оборудование. Испытания проводятся на стенде "Трибовак ВП-I", который состоит из высоковакуумного откачного агрегата ЭРА-300-2, высоковакуумного вентиля ДУ-100, камеры трения с нагрузочно-измерительным устройством (НИУ) и приборной стойки .

Схема камеры трения и нагрузочно-измерительного устройства для работы в диапазоне температур 300...600К представлена на рис. 6.

Испытуемые образцы: вал (I) и полувтулка (2) – вид А, а также пластина (9) и индентор (II) – вид Б.

Вал(I) располагается на опорном столике (3), а полувтулка (2) прикреплена винтом (23) к захвату (I0). Закрепленные опорой (3) и захватом (I0) образцы устанавливают на плите (7). Плита через упругие подвесы (6) и тензобалки (I5) скреплена с блоком (5). Блок расположен на штоке (I7), который перемещается возвратно-поступательно от электродвигателя с редуктором и винтового механизма (I6).

Нагрузочно-измерительное устройство в виде параллелограммного механизма (20) и тензопластины нагрузки (I3) с винтом (I2) размещено на фланце (I4) камеры (2I). Сила трения измеряется с помощью тензопластин (I5) с тензодатчиками. После установки образцы нагружают с помощью винта (I2) и параллелограммного механизма (20).

При включении электродвигателя и возвратно-поступательном движении блока (5) тензопластины (I5) изгибаются и по их деформации оценивается сила трения. Установка "Трибовак ВП-I" позволяет проводить одновременно испытания двух пар образцов.

6.5. Проведение испытаний.

6.5.I. Подготавливая образцы к испытаниям, измеряют диаметры вала, втулки (инцентора, пластины), чистоту и твердость трущихся поверхностей, толщину антифрикционного покрытия. Результаты измерений с указанием марок материалов и покрытия регистрируют в журнале.

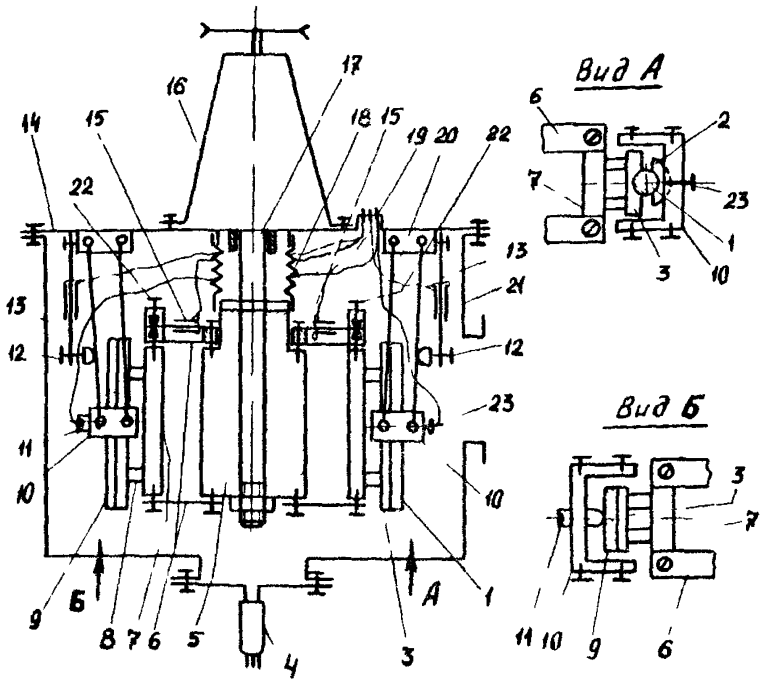



Рис. 6. Схема камеры трения и нагрузочно-измерительного устройства

I - подвижный образец - вал, 2 - неподвижный образец - полувтулка, 3 - опора, 4 - датчики давления ПМТ-2 и ПпИ-2, 5 - блок, 6 - упругие подвесы, 7 - плита, 8 - стойка, 9 - подвижный образец - пластина, I0 - захват, II - неподвижный образец -инденторI2 - винт нагрузки, I3 - тензобалка нагрузки, I4 - фланец, I5 - тензобалка измерения силы трения, I6 - механизм преобразования вращательного движения в возвратно-поступательное, I7- шток, I8 - сильфон, I9 - гермоввод, 20 - параллелограммный механизм, 2I - камера трения, 22 - винт тензобалки трения, 23 - винт крепления полувтулки к захвату

На контактирующих (трущихся) поверхностях не должно быть раковин, зауселиц и других дефектов, видимых невооруженным глазом, при наличии антифрикционных покрытий - отслоений, вспучиваний, повреждений и неравномерности его толщины.

6.5.2. Металлические образцы тщательно протирают бензином (ГОСТ 443-76), затем этиловым спиртом (ГОСТ 5962-67) и просушивают на воздухе. Для протирки используют бязь. Образцы из пластмасс с твердосмазочными покрытиями в растворах не промывать

6.5.3. Взвешивают образцы на аналитических весах АДВ-200м. Результаты заносят в журнал.

6.5.4. Производят тарировку тензопластины нагрузочно-измерительного устройства (прил. 6).

6.5.5. Устанавливают испытываемые образцы в камеру трения (перекос, повреждение поверхностей не допускаются).

6.5.6. Убедившись в нормальной работе узла трения, уплотняют камеру и создают условия окружающей среды согласно ТУ.

Откачку камеры производят поэтапно: сначала цеолитовым насосом до $5.10^{-2}$ Па, затем магниторазрядным насосом и азотным экраном до давления $\leqslant 10^{-5}$Па. Давление газовой среды устанавливают в соответствии с техническими требованиями.

6.5.7. Получив в камере трения заданные условия окружающей среды, прогревают тензоаппаратуру и регистрирующий прибор в течение 20 минут.

6.5.8. С помощью нагрузочно-измерительного устройства и винта (12) нагружают образцы до рабочей нагрузки, контролируя ее по регистрирующему прибору тензометрической установки.

6.5.9. Включают электропривод и через винтовой механизм обеспечивают возвратно-поступательное движение блока (5) с образцами.

6.5.10. Во время испытаний фиксируют: коэффициент трения, температуру, частоту возвратно-поступательного переме-

щения, нагрузку, параметры окружающей среды (вакуум, газовые среды, давление) .

6.5.II. Продолжительность испытания определяется заданным по техническому заданию временем эксплуатации натурного узла или моментом выхода из строя вследствие необратимого увеличения коэффициента трения и температуры в зоне трения или заедания в трущейся паре.

6.5.I2. По окончании испытаний образцы извлекают из камеры трения, очищают от продуктов износа мягкой волосяной кисточкой и струей воздуха из резиновой груши, взвешивают и обмеривают. Все данные заносят в журнал.

При испытании пар трения с твердосмазочными покрытиями их износ контролируют с помощью прибора "Измеритель толщины ИТ-I" (прил. 7) или другими (см.п.2.4) средствами.

6.6. Обработка результатов

6.6.I. Величину коэффициента трения определяют по формуле:

$$f = \frac{F}{N},$$

где $F$ - сила трения, Н; $N$ - нагрузка, Н.

При необходимости вычисляют значения $f_{min}$ и $f_{max}$ за время испытаний.

6.6.2. Износ измеряют с помощью профилографа-профилометра типа "Калибр 252", толщиномера ИТ-I, а также взвешивая на аналитических весах АДВ-200М.

6.6.3. Массовый износ вала вычисляют по формуле

$$W_m = W_{m1} - W_{m2},$$

где $W_{m1}$ и $W_{m2}$ - масса вала (пластины) до и после испытаний, г.

Массовый износ полувтулки (индентора) - из выражения

$$W'_m = W'_{m1} - W'_{m2},$$

где $W'_{m1}$ и $W'_{m2}$ - масса полувтулки (индентора до и после испытаний, г.

Массовая интенсивность изнашивания $I$ вала (пластины) и полувтулки (индентора) $I_{в(п)}=\frac{W_m}{L_{в(п)}}$, $I_{п/в(и)}=\frac{W'_m}{L_{п/в(и)}}$, $\frac{г}{м}$,

где $L_в$ и $L_{п/в}$ – пути трения вала и полувтулки

$L_в=2bnt=2bN$,

где $b$ – ширина втулки, м; $n$ – частота циклов возвратно-поступательного движения, циклов/мин; $t$ – длительность испытания пары трения, мин; $N$ – общее число циклов за время испытаний.

$$L_{п(в)}=2lN,$$

где $l$ – длина хода.

6.6.4. Линейный износ вала $W_l=\frac{d_{1в}-d_{2в}}{2}$,

где $d_{1в}$ и $d_{2в}$ – диаметр вала до и после испытаний в месте износа, мкм.

Линейный износ полувтулки $W'_l=\frac{d_{1п/в}-d_{2п/в}}{2}$,

где $d_{1п/в}$ и $d_{2п/в}$ – диаметр полувтулки до и после испытаний, мкм,

Средняя линейная интенсивность изнашивания вала и полувтулки $I_в=\frac{W_l}{L_в}=\frac{W_l}{2bN}$, $I_{п/в}=\frac{W'_l}{L_{п/в}}=\frac{W'_l}{2lN}$,

где $L$ – путь трения соответственно вала и полувтулки, мкм за время работы, мин, $W_l$, $W'_l$ – их максимальный линейный износ, мкм.

При наличии на вале тонкослойного смазочного покрытия $W_l$ – его толщина, мкм; $t$ – время полного износа, мин.

Результаты испытаний оформляются протоколом (прил.9).

ПРИЛОЖЕНИЯ

## I. Расчет давления на площадь контакта

В общем случае среднее давление на макроконтакте определяется как нормальная нагрузка $N$, приходящаяся на единицу площади контакта $A_c$, согласно выражению

$$P_c = \frac{N}{A_c} \quad \left(\frac{H}{M^2}\right). \qquad (I)$$

Для торцевой схемы (при отсутствии волнистости на поверхностях трения), а тем более пальчиковой можно принять, что контурная площадь $A_c$ равна номинальной $A_a$ и, следовательно, контурное давление $P_c$ равно номинальному $P_a$.

Для схемы вал–втулка среднее давление на контакте составит

$$\bar{P} = \frac{P_o}{2 r \varphi_o} \quad \left(\frac{H}{M^2}\right), \qquad (2)$$

где $P_o = \frac{N}{l}$ – нагрузка на единицу длины втулки, $\frac{H}{M}$;
$\varphi_o$ – половина угла зоны контакта, рад., рассчитываемая по методике прил.2; $r$ – радиус вала (втулки), м.

Расчет контактных параметров для схемы вал–втулка:

проверяется возможность расчета контактных параметров подшипника скольжения по теории Герца (см.II). Если это неравенство выполняется, то угол контакта и среднее давление рассчитывают по формулам (I2) и (2);

если неравенство (I3) не выполняется, то расчет ведут по одному из указанных в прил.2 вариантов ( $\psi < 10^{-2}$ или $\psi > 10^{-2}$ ); $E_1$, $E_2$ – модули упругости материалов втулки и вала, $\frac{H}{M^2}$.

2. Определение путей трения сопряженных деталей

I. Торцевая схема.

а) $K_{вз} = I$. Путь трения одинаков как для вращающегося, так и неподвижного образцов и определяется из выражения:

$$L = \pi D_{ср} m 10^{-6}, \text{ км}, \quad (3)$$

где $D_{ср}$ - средний диаметр дорожки трения, мм; $m$ - число циклов (оборотов), совершенное вращающимся образцом за время его износа на зарегистрированную величину $h$, $m = nt$, где $n$ - частота вращения образца, об/мин; $t$ - время работы, мин.

б) $K_{вз} < I$. В этом случае для образца с выступами путь трения $L_в$ равен той же величине

$$L_в = \pi D_{ср} m 10^{-6}, \text{ км}, \quad (4)$$

для сплошного контробразца

$$L_{спл} = b K m 10^{-6}, \text{ км}, \quad (5)$$

где $b$ - ширина выступа, мм; $K$ - число выступов.

2. Пальчиковая схема.

Независимо от того, вращается ли диск вокруг своей оси, а образцы (пальчики) неподвижны, или наоборот, путь трения для диска равен

$$L_д = d K m 10^{-6}, \text{ км}, \quad (6)$$

где $d$ - диаметр пальчикового образца, мм; $K$ - количество образцов.

Для каждого из К образцов путь трения

$$L_{обр} = \pi D_{ср} m 10^{-6}, \text{ км}, \quad (7)$$

где $D_{ср}$ - средний диаметр дорожки трения на длине, мм.

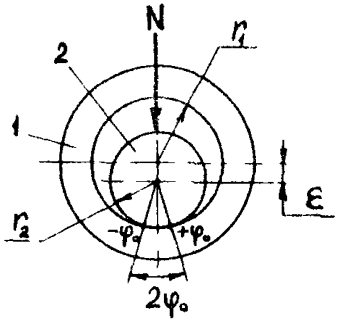



Рис.7. Схема контакта вала и втулки: I – втулка; 2 – вал.

3. Схема вал-втулка.

а) Вал вращается в неподвижной втулке. Путь трения втулки

$$L_{вт} = \pi D_в m 10^{-6}, \text{ км}, \tag{8}$$

где $D_в$ – диаметр вала, мм.

Путь трения вала

$$L_в = \varphi_0 D_в m 10^{-6}, \text{ км}, \tag{9}$$

где $\varphi_0$ – половина угла зоны контакта, рад.

б) Втулка вращается относительно неподвижного вала. Путь трения втулки

$$L'_{вт} = \varphi_0 D_в m 10^{-6}, \text{ км}. \tag{10}$$

Путь трения вала

$$L'_в = \pi D_в m 10^{-6}, \text{ км}. \tag{11}$$

Для определения половины угла зоны контакта $\varphi_0$ (рис.7) используется формула Герца

$$\varphi_0 = \arcsin \sqrt{\frac{4}{\pi}\left[\left(1-\mu_1^2\right)+\left(1-\mu_2^2\right)\psi\right]\frac{P_0}{E_1 \varepsilon}}, \tag{12}$$

где $\mu_1$, $\mu_2$ – коэффициенты Пуассона материала втулки и вала;

$$\psi = \frac{E_1}{E_2},$$

$E_1$, $E_2$ – модули упругости втулки и вала, Па;

$P_0 = \frac{N}{l}$ – нагрузка на единицу длины (погонная нагрузка), Н/м;

$\varepsilon = r_1 - r_2$ – радиальный зазор сопряжения.

Формула Герца применима, если выполняется условие

$$\left[(1-\mu_1^2)+(1-\mu_2^2)\right] \leq 0{,}092 . \qquad (13)$$

Тогда $\varphi_0 \leq \frac{\pi}{6}$.

Если неравенство не выполняется, пользуются решениями, в которых не содержатся ограничения на размеры зоны контакта.

При этом различаются два случая.

$\psi \leq 10^{-2}$ – для подшипников с полимерной втулкой.

Для разрезной втулки

$$K = \frac{P_0}{E_1 \varepsilon} = \varphi(\varphi_0), \qquad (14)$$

где $\varphi(\varphi_0) = \frac{2\varphi_0 - \sin 2\varphi_0}{\cos\varphi_0}$.

График функции $\varphi(\varphi_0)$ показан на рис.8, кривая I.

Множитель K – функция относительной толщины втулки $\gamma = \frac{r_1}{r_2}$ и коэффициента Пуассона $\mu_1$. В случае $\mu_1 = 0{,}5$

$$K = \frac{3}{2}\,\frac{1-\gamma}{\gamma}. \qquad (15)$$

Для сплошной втулки

$$K = \frac{P_0}{E_1 \varepsilon} = \varphi_1(\varphi_0), \qquad (16)$$

где $\varphi(\varphi_0) = \frac{2\varphi_0 - \sin 2\varphi_0}{\cos\varphi_0} + \frac{4\sin\varphi_0}{\pi - \varphi_0}\left(\operatorname{tg}\varphi_0 - \varphi_0\right)$,

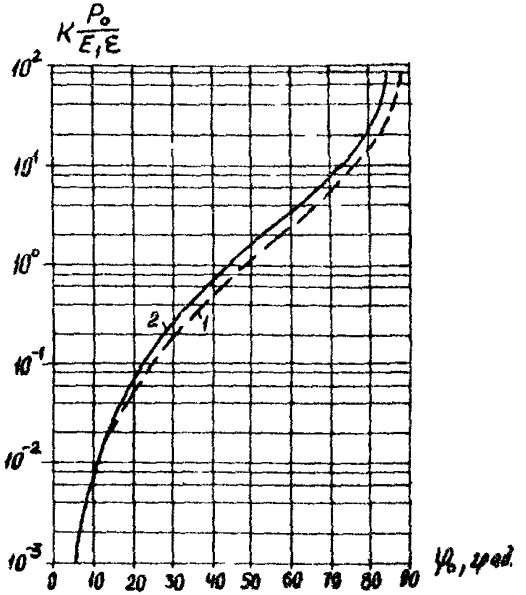



Рис.8. График функций: $\varphi(\varphi_0)=K\frac{P_0}{E_1\varepsilon}$ – кривая I

и $\varphi_1(\varphi_0)=K\frac{P_0}{E_1\varepsilon}$ – кривая 2

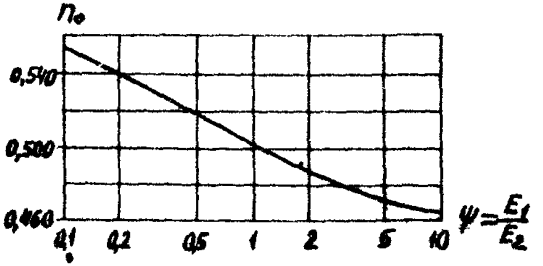



Рис.9. Зависимость $n_0$ от $\psi$

а К рассчитывают по формуле (I5).

График функции $\varphi_1(\varphi_0)$ показан на рис.8, кривая 2.

$\underline{\psi \geq 10^{-2}}$ – для подшипников с металлическими вкладышами, а также с тонкими антифрикционными покрытиями.

В этом случае

$$\varphi_0 = c\left(\frac{\alpha}{\alpha+1}\right)^n, \qquad (17)$$

где $\alpha = \frac{P_0}{E_1 \varepsilon}$, а показатель степени $n$ оценивается по формулам табл.4.

Таблица 4

| $10 \geq \psi \geq 0{,}1$ | $\psi > 10$ | $\psi < 0{,}1$ |
|---|---|---|
| $n = m_1\mu_1 + m_2 + n_0^*$<br>$m_1 = 0{,}07\ (1 + \lg\psi)$<br>$m_2 = 0{,}20\ (1 + \lg\psi)$ | $n = 0{,}41\ \mu_2 + 0{,}45$ | $n = 0{,}16\ \mu_1 + 0{,}55$ |

Зависимость $n_0$ от $\psi$ представлена на рис.9.

Следует отметить, что для подшипников с тонкими антифрикционными покрытиями $\psi$ следует определять после предварительной оценки значения отношения $\lambda = \frac{\delta}{r\varphi_0}$, где $\delta$ – толщина покрытия. Если $\lambda < 0{,}8 - 0{,}1$, то $\psi$ находят без учета механических свойств покрытия.

Коэффициент С рассчитывают следующим образом:

$$c = 0{,}32\left(\frac{c_0}{0{,}12} - 1\right)^n, \qquad (18)$$

где $c_0 = \frac{4}{\pi}\left[(1-\mu_1^2) + (1-\mu_2^2)\,\psi\right]$.

Формула (17) с учетом (18) принимает вид

$$\varphi = 0{,}32\left[\left(\frac{c_0}{0{,}12} - 1\right)\frac{\alpha}{\alpha+1}\right]^n \qquad (19)$$

3. Градуировка нагрузочно-измерительного устройства стенда "Трибовак Т-I"

Так как испытания проводят при постоянных нагрузках (2,5Н на каждый индентор по пальчиковой схеме и 7,5Н - по торцевой) обычными гирями, то градуировке подвергается лишь тензобалка измерения силы трения (5) с наклеенными тензодатчиками (6) рис.IO.

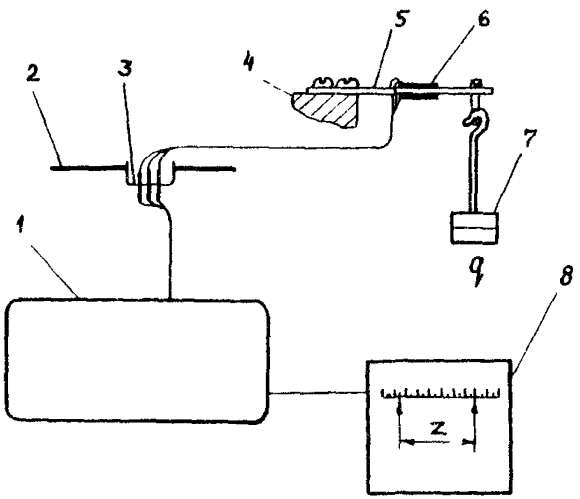



Рис.IO. Схема градуировки НИУ торцевой камеры трения:

I - тензоусилитель, 2 - нижний фланец камеры трения, 3 - гермоввод, 4 - опора тензобалки, 5 - тензобалка измерения силы трения, 6 - тензодатчик, 7 - груз имитации силы трения, 8 - регистрирующий прибор (КСП-4)

Градуировку осуществляют следующим образом:

Устанавливают закрепленную на опоре тензобалку с наклеенными тензодатчиками в горизонтальное положение.

Выводы тензодатчиков соединяют с полумостом тензоусилителя 8АНЧ-7М.

Включают на прогрев на 20-30 минут тензоусилитель и регистрирующий прибор КСП-4.

Подвешивают на незакрепленном конце тензобалки поочередно различные гири, имитирующие деформацию от сил трения, и записывают показания на шкале регистрирующего прибора КСП-4.

Строят график зависимости числа делений $Z$ от нагрузки (силы трения $F$ ) в Ньютонах.

По установившемуся числу делений $Z$ на шкале КСП-4 определяют силу трения и подставляют ее в формулу для расчета коэффициента трения $f = \frac{F}{N}$ .

## 4. Градуировка нагрузочно-измерительного устройства стенда "Трибовак В-I"

Схема градуировки нагрузочно-измерительного устройства (НИУ) при работе в диапазоне 300...600К, представлена на рис.II.

Устройство подвешивают на подвесе (I0) штока (II). Вал (I) со втулкой (2) устанавливают в обойме (5), а подшипник качения (7) - в траверсе (6). Втулка и обойма закрепляются винтом (3).

Подвешивая грузы (4) к траверсе (6) обоймы (5) создают различные нагрузки на втулку с валом.

С валом жестко соединен рычаг (I3), к концу которого подвешивают поочередно грузы $g$ (I6), создающие градуировочные моменты на втулке (2). Так как втулка жестко закреплена с обоймой (5), то эти моменты прикладываются к обойме. Повороты обоймы на некоторые углы вызывают деформации тензопластины (8), которые регистрируются тензодатчиками, соединенными с тензообразователем (I4) и самопишущим прибором (I5).

Величину градуировочного груза $g$ вычисляют из равенства момента трения между валом и втулкой и градуировочного момента: $fGr = gl$, где $f$ - коэффициенты трения между валом и втулкой; $G$ - груз, создающий нагрузку, Н; $r$ - радиус вала (половина диаметра вала), мм; $g$ - груз, создающий градуировочный момент, Н; $l$ - длина градуировочного рычага, мм.

Градуировочный груз при заданном коэффициенте трения и заданной нагрузке $G$

$$g = f\frac{r}{l}G.$$

При $l$ = I00 мм, $r = \frac{d}{2}$ = 5 мм, $g = 0{,}05fG$.

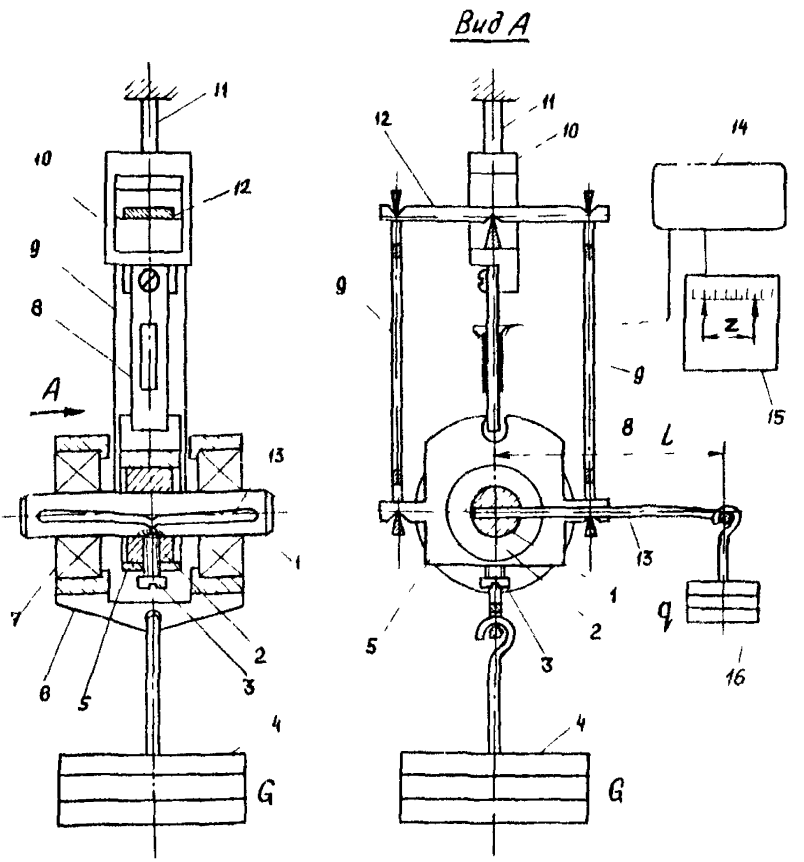



Рис.II. Схема градуировки НИУ камеры трения вал-втулка

I-вал; 2-втулка; 3-винт,скрепляющий вал,втулку и обойму; 4-груз нагрузки; 5-обойма; 6-траверса; 7-подшипники; 8-тензобалка; 9-тяги; I0-подрес; II-шток; I2-коромысло; I3-рычаг; I4-тензоусилитель; I5-регистрирующий прибор; I6-грузы имитации момента трения

Таблица 5

| $g$, Н | $z$, дел. | $f$ | Примечания |
|---|---|---|---|
| | 5 | 0,05<br>0,1<br>0,2<br>0,3<br>0,4<br>0,5 | |

Градуировку проводят в диапазоне ожидаемых коэффициентов трения и нагрузок в следующем порядке.

Включают на прогрев аппаратуру и проверяют все соединения.

Подвешивают к обойме грузы $G$, создающие нагрузку между валом и втулкой.

Затем подвешивают поочередно грузы $g$, создающие градуировочные моменты, соответствующие разным коэффициентам трения $f$, и записывают в табл.5 значения $z$ с регистрирующего трение прибора КСП-4.

Вычисляют градуировочный масштаб трения шкалы прибора $K = \frac{f}{z}$ (например, $\frac{0,05}{5} = 0,01 \frac{1}{\text{дел}}$).

## 5. Градуировка нагрузочно-измерительного устройства стенда "Трибовак Т-2"

**Схема градуировки представлена на рис.I2.**

К штоку (7) прикреплен двуплечный рычаг (2I), к концам которого подвешиваются грузы (22), один через блок (23) для создания момента на штоке и тензобалке. Тензодатчики на тензобалке соединяются с тензопреобразователем (24) (прибор 8АНЧ-7М), с которого сигнал подается на регистрирующий прибор (25) (КСП-4).

Величину градуировочного груза $q$ вычисляют из равенства момента трения между кольцом и контробразцом и градуировочного момента:

$$fNr_т = 2ql,$$

где $q$ - вес градуировочного груза, Н; $l$ - длина плеча рычага, см.

Градуировочный момент, соответствующий заданным $q$ и $l$, равен

$$M = 2ql.$$

Средняя удельная нагрузка на площади контакта вычисляется по формуле $P_a = \frac{N}{S}$,

где $S = \frac{\pi}{4}(d_{вн}^2 - d_{вн}^2)$ - площадь трения образцов, $м^2$.

При Ра = 500 $Н/см^2$

$S = \frac{\pi}{4}$ $(I,8^2 - I,0^2) = I,76$ $см^2$ и

$N = Pa \cdot S = 500 \cdot I,76 = 880$ Н;

$r_т = \frac{I,8+I}{4} = 0,7$ см; $l = 6,5$ см;

$f = \frac{2ql}{Nr_т}$ для $q = 20$Н, $f = \frac{2 \cdot 20 \cdot 6,5}{880 \cdot 0,7} =$ $= 0,42.$

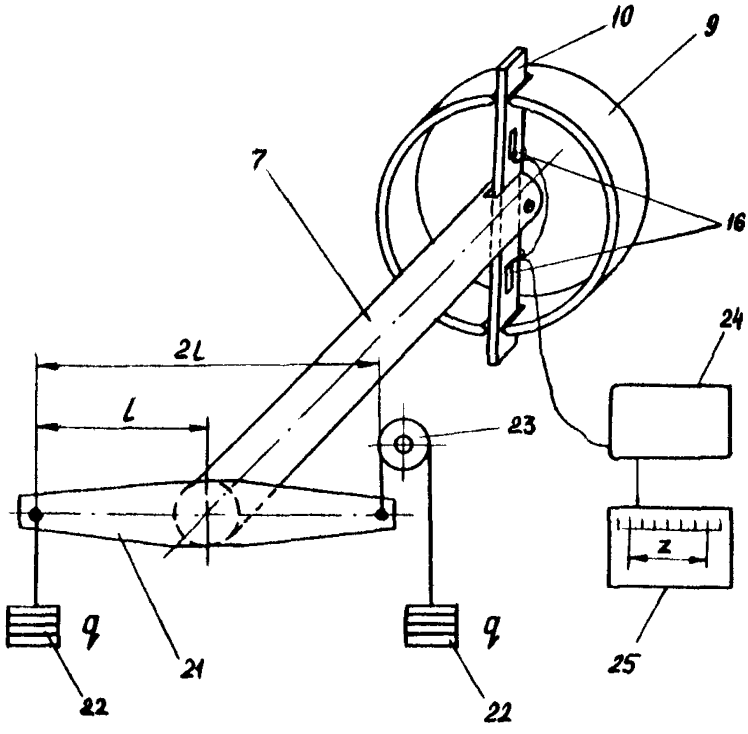



Рис 12. Схема градуировки нагрузочно-измерительного устройства стенда "Трибовак Т-2"

Таблица 6.

| q, Н | z, дел. | M, Н·см | f | Примечание |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |

Градуировку проводят в диапазоне ожидаемых коэффициентов трения в следующем порядке.

Включают на прогрев аппаратуру в течение 20-30 мин и проверяют все соединения.

Подвешивают поочередно грузы q , создающие градуировочные моменты на тензобалке, соответствующие разным M, и записывают в табл. 6 значения z с регистрирующего трение прибора КСП-4.

Вычисляют градуировочный масштаб трения шкалы прибора

$$K = \frac{f}{z} .$$

### 6. Градуировка нагрузочно-измерительного устройства стенда "Трибовак ВП-I"

Схема градуировки НИУ представлена на рис. I3.

Градуировку тензопластин нагрузки проводят в ожидаемом диапазоне в следующем порядке.

Закрепляют на опоре (I6) тензобалку нагрузки (I3) с наклеенными тензодатчиками.

Соединяют тензодатчики с полумостом тензоусилителя 8АНЧ-7М (II), с которого подается сигнал на регистрирующий прибор КСП-4 (I2).

Включают на прогрев (30 мин) приборы 8АНЧ-7М и КСП-4.

Подвешивают поочередно грузы $G$, создающие градуировочные нагрузки на тензобалке и записывают в таблицу соответствующие им значения $z_1$ с прибора.

Вычисляют градуировочный масштаб шкалы

$$K_1 = \frac{N}{z_1}, \quad (N = G),$$

(например $K_I = \frac{18,5}{30} = 0,62$ кгс/дел.).

Для градуировки тензопластины силы трения (8) подвешивают груз $q$ к отверстию подвижного образца (I). При этом деформируются и изгибаются упругие подвесы (5), с которыми связана тензопластина.

Подвешивают поочередно грузы $q$, имитирующие силы трения на тензобалке и записывают в таблицу соответствующие им значения $z_2$.

Вычисляют градуировочный масштаб шкалы прибора $K_2$

$$K_2 = \frac{F}{z_2}, \quad F = q \qquad (\text{например } K_2 = \frac{I2}{40} = 0,3 \text{ кгс/дел}).$$

Градуировку тензобалки (8) проводят в диапазоне ожидаемых сил трения (коэффициентов трения $f = \frac{F}{N}$).

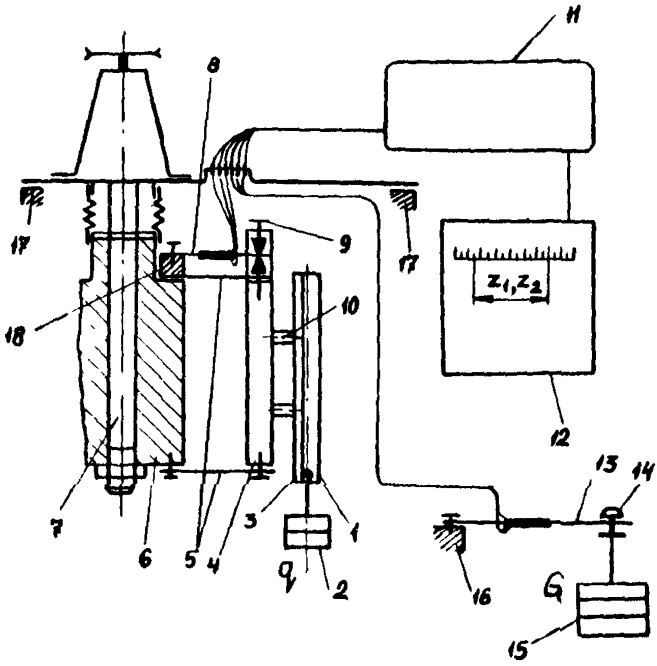



Рис. 13. Схема градуировки НИУ камеры трения с возвратно-поступательным движением:

1-подвижной образец - вал, 2-груз имитации силы трения, 3-опора, 4-плита, 5-упругие подвесы, 6-блок, 7-шток, 8-тензобалка измерения сил трения, 9-винт тензобалки силы трения, 10-стойка, 11-тензоусилитель, 12-регистрирующий прибор, 13-тензобалка измерения силы нагрузки, 14-винт нагрузки, 15-грузы нагрузки, 16-опора тензобалки, 17-опора фланца камеры трения, 18-проставка

## 7. Измерение толщины тонкослойных антифрикционных покрытий на металлических образцах

Толщина тонкослойных антифрикционных покрытий на металлических образцах измеряется с помощью толщиномера ИТ-I прокалыванием мягкого покрытия стальной иглой до металлической подложки.

Толщиномер, серийно выпускаемый заводом "Калибр" (см. рис.I4), состоит из трех основных элементов: измерительной стойки с механотроном (9), регистрирующего прибора системы БВ-3040У (II) и омметра (I2). Механотронный датчик с наконечником (I0) и иглой (4), закрепляемой винтом (I8) на упругом подвесе (I7), установлены на стойке (7). На основании (I) расположена призма (2), на которой поочередно размещаются плитка (плоско-параллельная мера) (I4) из набора концевых мер (ГОСТ 9038-59) и образец (3) с покрытием (I5) толщиной $h$ мкм. Рабочее положение механотрона регулируется микрометрическим винтом (8), а нулевой уровень иглы и наконечника винтом (6). Винтами (5) и (I3) подключается омметр.

Измерение толщины покрытия:

Подготовить измерительную систему БВ-3040У согласно техническому описанию и инструкции по эксплуатации.

На основании стойки (9) установить призму (2).

На призму положить плитку (I4). Их общая толщина должна равняться приблизительно высоте образца с призмой.

Вращением микрометрического винта (8) подвести наконечник механотрона (I0) к плитке (может быть рассогласование между иглой (I4) и наконечником величиной $\Delta$ поз.I).

С помощью этого же винта подвести иглу к плитке до устранения рассогласования по омметру (поз.II).

Вращая винт (6) установить нулевой уровень по прибору БВ-3040У (0 на приборе и на омметре) (поз.Ш).

Винтом (8) отвести наконечник и иглу от плитки; снять плитку, установить образец с покрытием и подвести наконечник

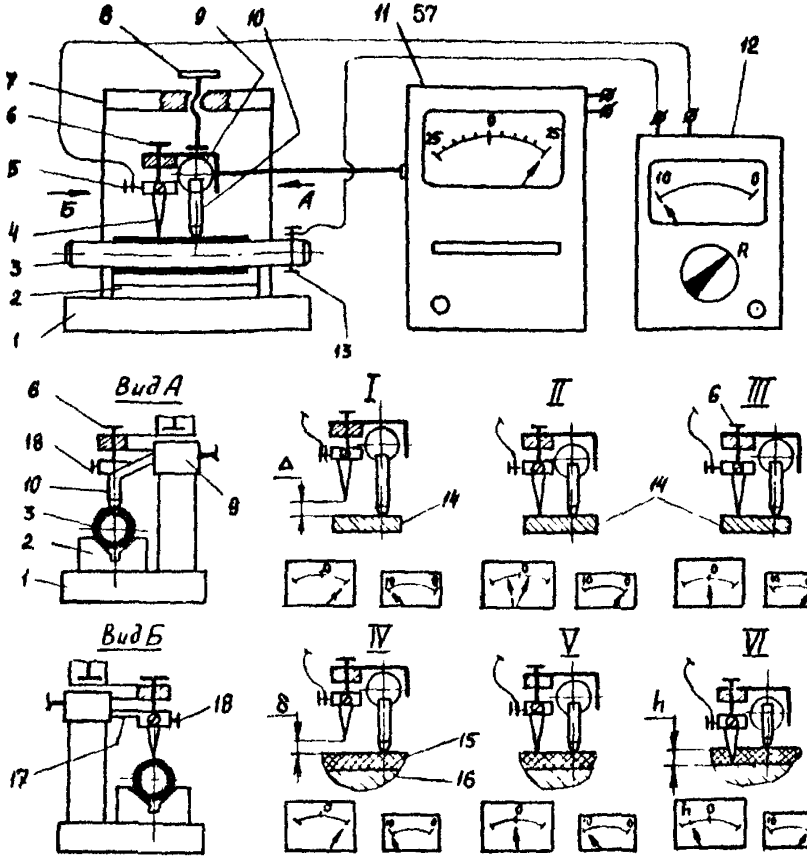



Рис.I4. Схема прибора ИТ-I для измерения толщин покрытия и принцип его работы:

I-столик, 2-призма, 3-образец, вал с покрытием, 4-игла, 5-винт контакта, 6-винт регулировки относительного положения иглы и наконечника механотрона, 7-стойка, 8-микрометрический винт БВ-3040У, 9-механотрон, I0-наконечник механотрона, II-прибор ЕВ-3040У, I2-омметр, I3-винт контакта, I4-плоскопараллельная мера, I5-твердое смазочное покрытие, I6-подложка (образец), I7-упругий подвес иглы, I8-винт крепления иглы, Δ - рассогласование между иглой и наконечником до установки "нулевого уровня", δ - рассогласование между иглой и наконечником при "нулевом уровне", h - толщина твердого смазочного покрытия.

I,II,III -настройка прибора, IУ...УI - измерение толщины покрытия, I - положение иглы и наконечника механотрона до установки "нулевого уровня", II - положение иглы и наконечника при установке "нулевого уровня", III -"нулевой уровень", IУ-положение иглы и наконечника до измерения, У-"нулевой уровень" перед измерением толщины покрытия, УI-положение иглы и наконечника в конце измерения

к поверхности покрытия ( $\delta$ - рассогласование между иглой и наконечником при нулевом уровне), присоединить омметр к образцу и механотрону (поз.IУ). Подвести иглу к поверхности покрытия (0 на приборе БВ-3040У)- поз.У и произвести прокол до металлической подложки (следить за стрелкой омметра). Контакт иглы с подложкой определяют по минимальному значению сопротивления, толщину покрытия $h$ по показаниям стрелочного прибора БВ-3040У (поз.УI).

Поднять наконечник с иглой и снять образец.

Измерения провести в 5 - 8 точках образца по ожидаемому месту контакта и вычислить среднюю толщину покрытия.

Результаты измерений записать в журнал (протокол) испытаний.

8. Определение погрешностей испытаний

Среднее значение коэффициента трения для всех образцов партии $\bar{f} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} f_i$.

Несмещенная оценка среднего квадратического отклонения коэффициента трения

$$S_f = M_K \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(f_i - \bar{f})^2} .$$

Границы доверительного интервала значений коэффициента трения

$$\varepsilon = \frac{t_\gamma S_f}{\sqrt{n}} .$$

Коэффициент Стьюдента $t_\gamma$ для заданного значения доверительной вероятности $\gamma$ и числа испытываемых образцов ($\geqslant 5$) - по табл. 2 ГОСТ 11.004-74.

Результаты измерений коэффициента трения

$$f = \bar{f} \pm \varepsilon .$$

Относительная погрешность результатов измерений коэффициента трения с вероятностью $\gamma$

$$\varepsilon_o = \frac{\varepsilon}{\bar{f}} 100\% .$$

Погрешности результатов измерений износа, интенсивности износа, путей трения, ресурса работоспособности и т.п. определяют по аналогичным формулам.

9. Форма протокола результатов триботехнических испытаний

ПРОТОКОЛ №
триботехнических испытаний

_____ 19 г.

Пара трения _____
Стенд _____
Вид контактной пары _____

| Элементы контактной пары | Материал | Термообработка | Покрытие | Толщина покрытия |
|---|---|---|---|---|
| Подвижный образец | | | | |
| Неподвижный образец | | | | |
| Термообработка | | | | |
| Покрытие | | | | |
| Толщина покрытия | | | | |
| Разработчик | | | | |
| Изготовитель | | | | |
| Дата изготовления | | | | |

Условия испытаний
среда _____
давление окружающей среды _____ Па
нормальная нагрузка _____ Н
номинальное давление на площадь контакта _____ Н/мм$^2$
частота вращения подвижного образца _____ об/мин
скорость скольжения _____ м/с
температура образцов _____ К
время испытаний _____

## Результаты испытаний

| Результаты испытаний | | Элементы пары трения | | | | | | | | | | | | Примечания |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | подвижный образец | | | | | | неподвижный образец | | | | | | |
| | | №1 | №2 | №3 | №4 | №5 | средн. | №1 | №2 | №3 | №4 | №5 | средн. | |
| Путь трения, м | | | | | | | | | | | | | | |
| Линейный износ, мкм | | | | | | | | | | | | | | |
| Массовый износ, г | | | | | | | | | | | | | | |
| Линейная интенсивность изнашивания, мкм/км | | | | | | | | | | | | | | |
| Линейный износ покрытия, мкм | | | | | | | | | | | | | | |
| Коэффициент трения | min | | | | | | | | | | | | | |
| | средн | | | | | | | | | | | | | |
| | max | | | | | | | | | | | | | |
| Ресурс, ч | | | | | | | | | | | | | | |

Вид поверхности трения после испытаний

Выводы

Начальник лаборатории

Испытания проводил

## Обозначения, принятые в рекомендациях

| Наименование термина | Обозначение | Размерность |
|---|---|---|
| Коэффициент трения | $f$ | – |
| Сила трения | $F$ | Н |
| Момент трения | М | Н·м |
| Износ | | |
| линейный | $W_l$ | м |
| массовый | $W_m$ | кг |
| объемный | $W_v$ | $м^3$ |
| Интенсивность изнашивания | $I$ | – |
| Путь трения | $L$ | м |
| Время испытаний | $t$ | час |
| Технический ресурс | $R$ | с,м,циклы |
| Нормальная нагрузка | $N$ | Н |
| Удельное давление (номинальное) | Ра | Па($Н/м^2$) МПа ($Н/мм^2$) |
| Площадь касания (контакта) номинальная | Аа | $м^2$ |
| Площадь контакта контурная | Ас | $м^2$ |
| Диаметр вала | Д | м |
| Диаметр втулки | $d$ | м |
| Параметр шероховатости | $R_a$ | мкм |
| Толщина покрытия | $h$ | мкм |
| Скорость скольжения | $V$ | м/с |
| Контурное давление | Рс | ($Н/м^2$)Па |
| Давление окружающей среды | Р | Па |
| Температура среды | Тс | К |
| Температура испытаний | Тисп | К |
| Средняя температура поверхности | Тп | К |

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ

РАЗРАБОТАНЫ Институтом машиноведения АН СССР им.А.А.Благонравова (ИМАШ)

ИСПОЛНИТЕЛИ:
д.т.н.И.В.Крагельский (руководитель темы), д.т.н.Дроздов Ю.Н., к.т.н.В.С.Камбалов, д.т.н.В.В.Ковелкин (руководитель темы), Н.А.Цеев, Ю.Т.Богатых, д.т.н.А.А.Силин, к.т.н.Б.М.Кривицкий, Ю.Г.Суслов.

УТВЕРЖДЕНЫ Приказом ВНИИНМАШ № 33 от 03.02.1988 г.

ВВЕДЕНЫ ВПЕРВЫЕ

ССЫЛОЧНЫЕ НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ДОКУМЕНТЫ

| Обозначение НТД, на который дана ссылка | Номер пункта, подпункта |
|---|---|
| ГОСТ 2789-73 | 2.3.1 |
| ГОСТ 3044-84 | 2.4.2 |
| ГОСТ 23.009-79 | 2.4.4 |
| ГОСТ 443-76 | 3.4.2 ; 4.6.1 ; 5.5.2 ; 6.5.2. |
| ГОСТ 5962-67 | 3.4.2 ; 4.6.1 ; 5.5.2 ; 6.5.2. |

## Содержание

Стр.

I. Основные положения ..... 3

2. Классификация конструктивных схем и машин трения ..... 5

3. Метод технологического контроля триботехнических характеристик материалов и твердосмазочных покрытий ..... I4

4. Метод определения коэффициента трения и интенсивности изнашивания материалов и покрытий по схеме вал-втулка вращательного движения ..... I9

5. Метод определения коэффициента трения и интенсивности изнашивания материалов и покрытий по торцевой схеме вращательного движения ..... 28

6. Метод определения коэффициента трения и интенсивности изнашивания материалов и покрытий по схеме вал-втулка возвратно-поступательного движения ..... 33

Приложения. ..... 40

I. Расчет давления на площадь контакта ..... 40

2. Определение путей трения сопряженных деталей . 4I

3. Градуировка нагрузочно-измерительного устройства стенда "Трибовак Т-I" ..... 4[illegible]

4. Градуировка нагрузочно-измерительного устройства стенда "Трибовак В-I" ..... 4[illegible]

5. Градуировка нагрузочно-измерительного устройства стенда "Трибовак Т-2" ..... 5I

6. Градуировка нагрузочно-измерительного устройства стенда "Трибовак-ВП-I" ..... 54

7. Измерение толщины тонкослойных антифрикционных покрытий на металлических образцах ..... 56

8. Определение погрешностей испытаний ..... 59

9. Форма протокола результатов триботехнических испытаний..... 60

Обозначения, принятые в рекомендациях..... 62

Методы оценки триботехнических свойств материалов и покрытий в вакууме

Рекомендации Р 50-54-107-88

Редактор Волкова А.И.
Мл.редактор Еремеева Т.В.

ВНИИНМАШ Госстандарта СССР

---

Ротапринт ВНИИНМАШ 123007, Москва, Шеногина, 4
Тираж 300 экз. Объем 3 уч.-изд.л. Цена 1 р.
Заказ №63-89-1 16.01.89г.

gost.e-ecolog.ru