



МЕТОДЫ ОЦЕНКИ  
ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ  
В ВАКУУМЕ

Р 50-54-107-88

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

## 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.1. 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 реалию, и предназначены для установления ориентировочных сроков службы деталей и предельно допустимого износа, анализа эффективности мероприятий по повышению надежности узла и др.

Последняя категория испытаний позволяет получить оценку работоспособности изделия при эксплуатации.

**1.с.** Данные рекомендации относятся к испытаниям первых двух категорий и распространяются на металлические и неметаллические материалы, применяемые в виде деталей трещущихся пар или тонкослойных покрытий, подвергаемых трением в контакте 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: торцевые (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 испытания узлов трения - поршень-цилиндр, плунжерная пара, цилиндрические направляющие втулки, штепсельных разъемов, направляющих штифтов и др. применяются указанные в табл. машины с возвратно-поступательным движением ("Трибовак ВП").

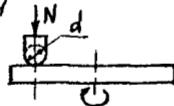
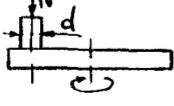
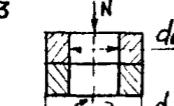
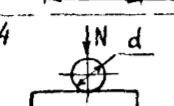
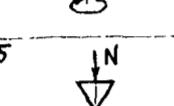
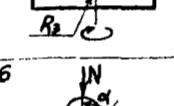
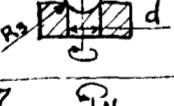
2.3. Форма и размеры образцов зависит от схемы испытаний и типа машины. При испытаниях второй категории вращающийся образец выполняют из того же материала, что и деталь натурного узла или (если это условие трудно выполнимо) неподвижный - из материала с большей теплопроводностью.

2.3.1. Для проведения одной серии испытаний образцы изготавливают 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 трением 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. условиях.
ТОРЦЕВЫЕ	1	 $P_a = 0,918 \sqrt{\frac{N}{d^2 K}}$ $K = \frac{1-\mu^2}{E_1} + \frac{1-\mu^2}{E_2}$ $\mu$ - коэф. Пуассона $E$ - модуль упругости	Технологический контроль триботехнических характеристик материалов	Трибовак T-I	МДП-1 ЧИМ УТИ
	2	 $P_a = \frac{4N}{\pi d^2}$	Шпоночные и шлицевые направляющие, имитация ходовой резьбы	Трибовак T-I	УМТ-1 МДП-1 МПИ-1 УТИ
	3	 $P_a = \frac{4N}{\pi (d_h - d)^2}$	Подпятники, торцевые опоры, торцевые уплотнения	Трибовак T-2 (T) Трибовак T-I	И-47 УМТ-1 МУГ-1 УТИ
	4	 $P_a = 0,918 \sqrt{\frac{N}{d^2 K}}$ $K = \frac{1-\mu^2}{E_1} + \frac{1-\mu^2}{E_2}$ $\mu$ - коэф. Пуассона $E$ - модуль упругости	Шаровые опоры и шарниры	Трибовак T-2 (III)	ОТ-1 УТИ
	5	 $P = 0,617 \sqrt{\frac{N E_{np}^2}{R_3}}$ $E_{np} = \frac{2E_1 E_2}{E_1 + E_2}$ $R_3$ - радиус закругления	Анкерные опоры	--	УТИ
	6	 $P = 0,59 \sqrt{\frac{N E_{np}}{R_3 d \sin \alpha}}$ $R_3$ - радиус закручивания края отверстия	Сферические опоры, шаровые клапана	--	МАСТ-1 УТИ
	7	 $P = 0,918 \sqrt{\frac{N}{3 d^2 K}}$	Подшипники качения	--	МАСТ-1

1	2	3	4	5	6
С возвратно-посту- пательным движением по роликам	8 	$P = 0.8 \sqrt{\frac{N D d}{L K D d}}$	Подшипники скольжения, цилиндрические шарниры	Трибовак B-I	СМЦ-2 УМТ-1
Вал-втулка	9 	$P = \frac{N \cdot 180}{\pi R d L}$	Вал-вкладыш	-" -	СМЦ-2
	10 	$P = 0.8 \sqrt{\frac{N}{L D K}}$	Роликовые подшипники, цепные передачи	-" -	
	11 	$P = 0.8 \sqrt{\frac{N d_1 d_2 q_1 q_2}{L K (d_1 d_2)}}$	Зубчатые и фрикционные передачи	Трибовак P	СМЦ-2 ММ-1М
	12 	$P = 0.8 \sqrt{\frac{N A}{L K (d + a)}}$ 4-зазор	Поршины, плунжеры, штепсельные разъемы	Трибовак ВП-1	
	13 	$P = \frac{4N}{\pi d^2}$	Различные направляющие	-" -	МИСТ-1

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.

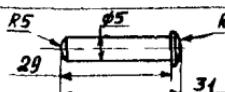
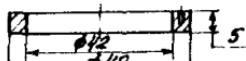
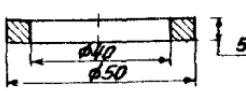
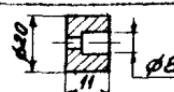
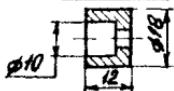
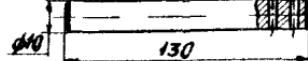
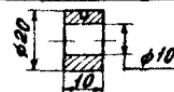
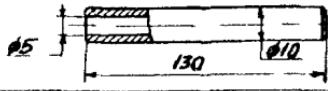
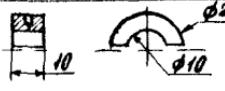
2.4. При испытаниях триботехнических характеристик материалов контролю и регистрации подлежат следующие параметры: нагрузка, температура испытаний, средняя температура поверхности трения, скорость скольжения, сила (момент) трения, путь трения (количество оборотов, циклов), давление в вакуумной камере,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

2.4.1. Номинальная нагрузка определяется расчетным путем из номинальной площади контакта трущихся образцов  $A_a(\text{мм}^2)$ . Для этого выбирают номинальное давление приходящееся на единицу площади контакта  $P_a(\text{Н/мм}^2) = \frac{N}{A_a}$ , 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  $\varnothing 0,5-0,8$  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-1	1	 палец (индентор)
	2	 кольцо I
	3	 кольцо 2
	4	 кольцо
	5	 контробразец
Трибовак В-1	6	 вал
	7	 втулка
Трибовак ВИ-1	8	 вал
	9	 полувтулка
	10	 индентор
	11	 пластина

для чего термопару приваривают к контробразцу, 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 самопищущими приборами, например КСП-4, ПСР и др., которые предварительно проверяют, термопары тарируют.

Замер средней объемной температуры образца – по показаниям трех датчиков при установленном значении температуры перед началом испытаний. Точность измерения  $\pm 3\%$ .

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.

Оптимальный 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  $\pm 3\%$ .

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  $\pm 3\%$ .

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

Методика определения путей трещихся деталей дана в прил. 2.

2.4.7. Давление в вакуумной камере и состав газовой среды измеряют с помощью стандартных вакууметров и газоанализаторов по 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. I. Она включает четыре основных узла: I – стандартный вакуумный агрегат (ЭРА-300), II – вакуумный вентиль,

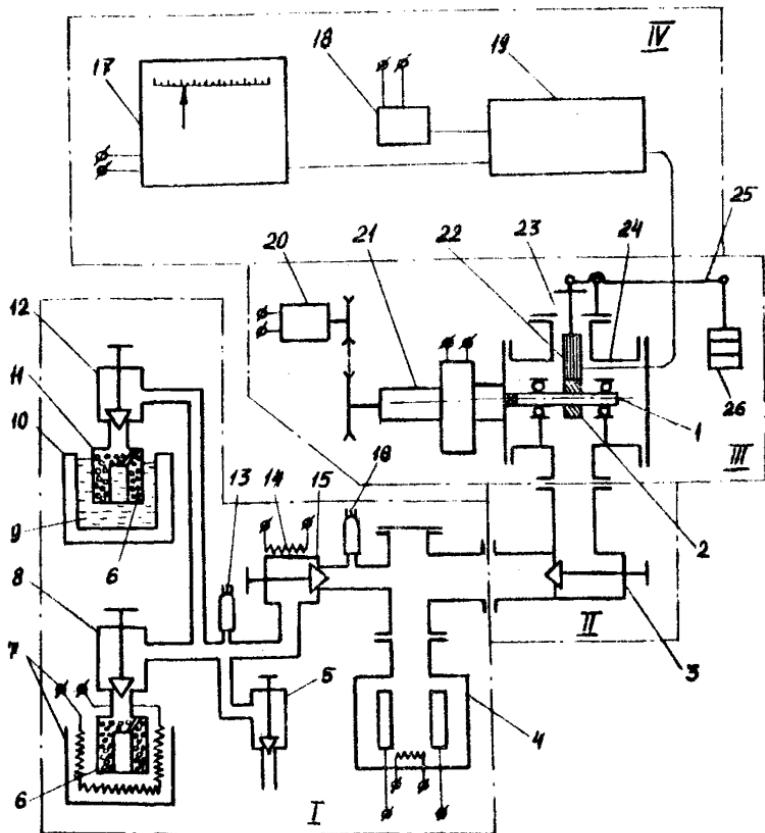


Рис. I Типовая схема установки серии "Трибовак":

I - вакуумный агрегат; II - отсечной вакуумный вентиль; III - камера трения с приводом; IV - 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 - жидкый азот; 10 - сосуд Дьюара; 11 - цеолитовый насос; 12 - вентиль ДУ-32; 13 - датчик давления ПМГ-2; 14 - нагреватель вентиля; 15 - вентиль ДУ-32; 16 - датчики давления ПМГ-2 и ПМИ-2; 17 - прибор, регистрирующий силу трения; 18 - блок питания, тензометрического усилителя; 19 - тензометрический усилитель; 20 - привод вращения образца; 21 - муфта првода вращения; 22 - НИУ - загрузочно-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; ІУ - контрольно-регистрирующая аппаратура.

Машина трения состоит из узла трения, привода вращения образцов нагруочно-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 ориентация 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 в системе объект - станок 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 ТРИБО- ТЕХНИЧЕСКИХ 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  $293 \pm 5$  К.

3.1. Схема и условия испытаний. Испытания проводят по пальчиковой или торцевой схемам, что позволяет получить два предельных случая для коэффициента взаимного перекрытия  $K_{B3}$ .

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 1 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 31 (или шар Ø 8 мм из Ст. 95Л18) - (см.табл.2, поз. 1). 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. 1, поз. 2,3).

Уменьшение одного из образцов, работающего по торцевой схеме, может быть вызвано необходимостью, с одной стороны, полного перекрытия трещущихся 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 (12) вакуумной камеры (4), состоит из магнитной муфты (16), на которой закреплен нижний (подвижной) образец-кольцо (1). 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 (16). Момент трения измеряют с помощью тензометрической балки (10) (с наклеенными датчиками), установленной на нижнем фланце (12), 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", ВАНЧ-7м, УТ-4 и др., регистрируется самопищущим 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.

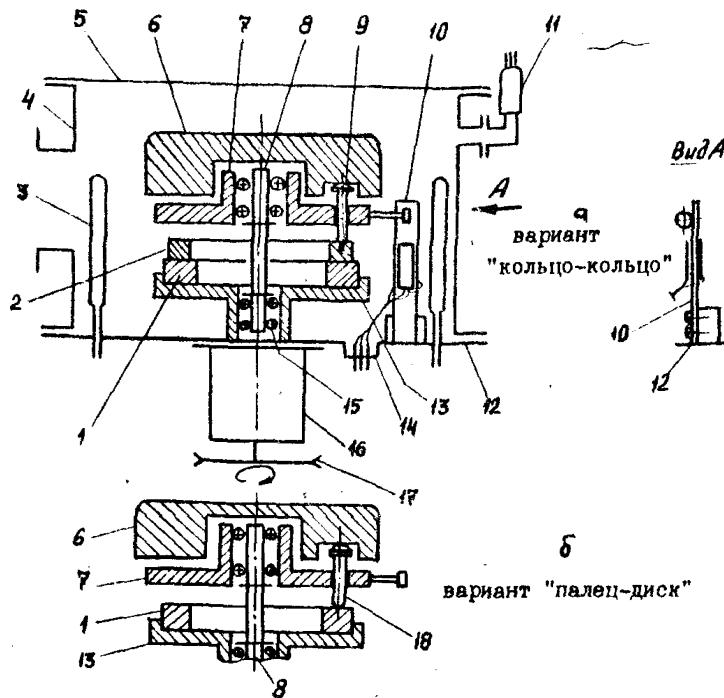


Рис. 2 . Схема камеры трения и нагружено-измерительного устройства:

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, II - датчики давления ПМТ-2 и ПМИ-2: 12 - нижний фланец, 13 - полый вал - столик, 14 - гермоввод, 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 откачуку или создают в ней газовую среду.

Откачивают камеру поэтапно: сначала цеолитовым до  $5 \cdot 10^{-1}$  Па, затем магниторазрядным насосами и азотным экраном до величины  $< 10^{-5}$  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  $\pm 1\%$ . Величину силы трения через каждые 600 с заносят в рабочую тетрадь. Разница незначительна, определяют ее среднее значение  $F_{\varphi} = \frac{1}{N} \sum F_i$ , 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 юстировкой и струей воздуха из резиновой груши, затем взвешивают и обмеривают для определения износа.

### 3.5. Обработка результатов испытаний

3.5.1. Величину коэффициента трения определяют по формуле:

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

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 эллюры;

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

$$W_m = \frac{A_n}{K_1 K_2} \sigma \pi d_{mp},$$

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

Среднее контактное давление вычисляют по формуле

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

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

где  $d$  -名义альный 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 (IV).

4.5.1. 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 (14) нагрузочно-измерительного устройства. Втулка закрепляется винтом (3). Обойма (14) и коромысло (16) с наклеенными тензодатчиками соединены тягами (15), образуя параллелограммный механизм, устанавливаемый на опорную призму штока нагрузки (9). Шток соединен с рычагом (II), на котором подвешивают груз (12). На штоке закреплена тензопластина (17), входящая другим концом в паз обоймы (14).

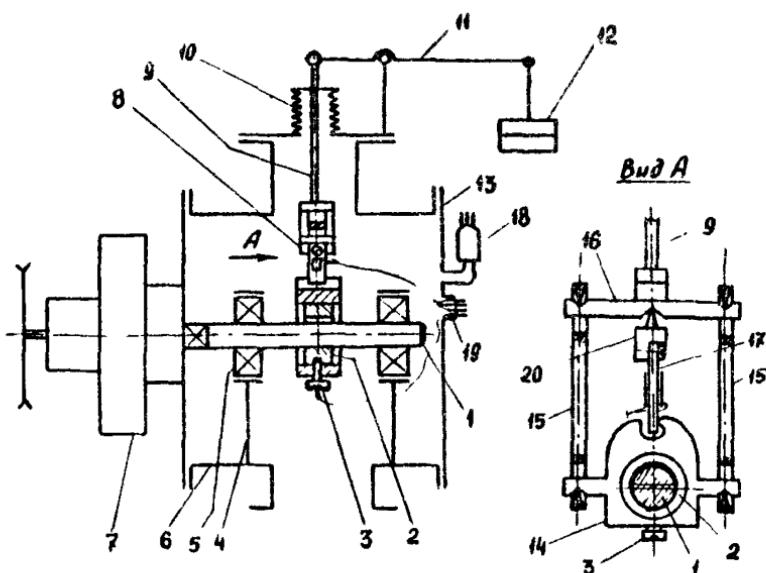


Рис. 3. Схема камеры трения и нагрузочно-измерительного устройства (НИУ) для работы в диапазоне температур 300...600К:

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 - сальфрон 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 - гермовод

Образцы, нагружено-измерительное устройство размещено в герметичной камере (6), к которой подстыкована электромагнитная муфта (7). Подвижный образец (1) соединен с валом муфты.

Нагружено-измерительное устройство работает таким образом. При подвешивании грузов (12) через рычаг (11), сильфон (10), шток (9), коромысло (16), тяги (15) подтягивается обойма (14), а следовательно, и втулка (2) на валу (1). Вследствие трения между валом и втулкой при включении привода и муфты (7) последняя вместе с обоймой (14) поворачивается на некоторый угол и отклоняет тензопластину (17) 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 (19).

Давление в камере измеряется датчиками ПМТ-2 и ПМИ-2 (18), расположенными на фланце (13) 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 нагружено-измерительного устройства для работы при температурах выше 600К представлена на рис. 4.

Испытуемые образцы – вал (1) и втулка (2) (подшипник) охватываются гибкой лентой (20), закрепленной на втулке винтом (3). Проволочными крючками (19) лента соединяется с двумя тензобалками (18), на которые наклеены тензодатчики (17). Тензобалки (18) прикреплены к сухарю (16) винтами. Сухарь соединен со стержнем (9), который герметично соединен с сильфоном (10) и рычагом нагрузки (11). Рычаг соединен со штангой нагрузки (12).

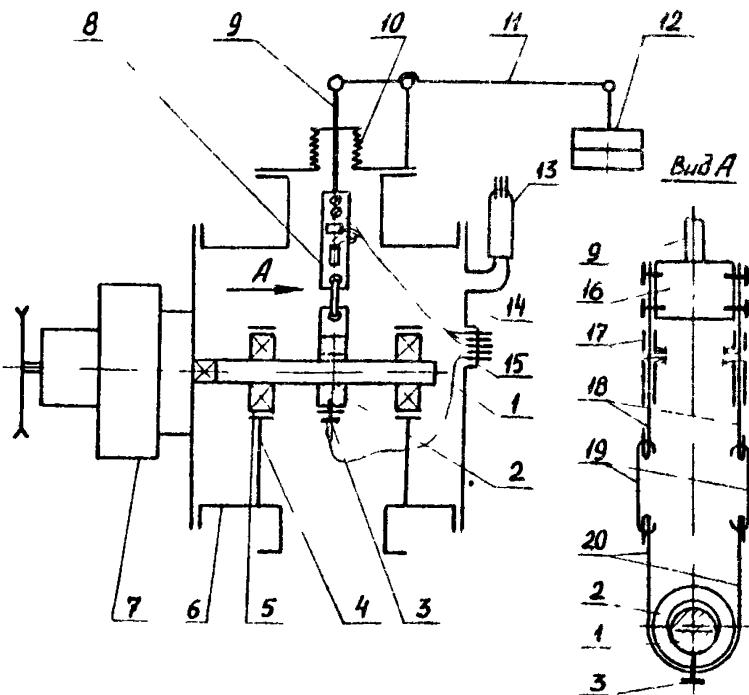


Рис. 4. Схема камеры трения и нагрузочно-измерительного устройства для работы при температурах выше 600 К:

1 - 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; 10 - сильфон; 11 - рычаг нагрузки; 12 - грузы нагрузки; 13 - датчики давления ПиТ-2 и ПИИ-2, 14 - фланец; 15 - гермоввод; 16 - сухарь; 17 - тензодатчики; 18 - тензопластины; 19 - подвесы; 20 - лента

Образец вал (1) расположен на подшипниках качения (5) в опорах (4).

Образцы и нагруженочно-измерительное устройство размещены в камере трения (6), к которой подстыкована электромагнитная муфта (7). Вал муфты соединен с валом (1). Образцы заменяются через большой съемный фланец (14). Камера трения через вакуумный вентиль ДУ-100 подсоединяется к откачному агрегату.

Нагруженочно-измерительное устройство работает следующим образом. Нагрузка с помощью груза (12) передается через рычаг (11), стержень (9), сухарь (6), тензобалки (17), крючки (19) на гибающую ленту (20) и втулку с багом. При включении привода и электромагнитной муфты возникает момент трения, вызывающий разное натяжение на концах ленты (20), а следовательно, разную деформацию на тензопластинах (18). Величина момента трения регистрируется тензопластинами (18) с наклеенными тензодатчиками (17).

#### 4.6. Проведение испытаний

4.6.1. Подготовка образцов: измеряют диаметр вала и втулки (внутренний), чистоту и твердость поверхности, толщину антифрикционного покрытия.

На контактирующих поверхностях не должно быть раковин, сколов, заусениц и других дефектов, видимых невооруженным глазом, а при наличии антифрикционных покрытий – отслоений, всучивания, 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 по-стапно: сначала цеолитовым насосом до  $5 \cdot 10^{-2}$  Па, затем магниторазрядным насосом и азотным экраном до величины  $\leq 10^{-5}$  Па.

4.6.5. Подготавливают тензоаппаратуру, электронный пультящий 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 волосянной щеточной 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-1" (прил. 7) или другими (см. п.2.4) средствами.

#### 4.7. Обработка результатов.

4.7.1. Коэффициент трения  $f$  вычисляют по формуле  $f=kz$ , где  $K$  - градуировочный масштаб шкалы регистрирующего прибора ( $\frac{1}{дел}$ );  $z$  - 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

$$I_a = \frac{W_m}{L_a}, \quad I_{am} = \frac{W'_m}{L_{am}} \quad (\frac{г}{м}),$$

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

#### 4.7.3. Линейный износ вала

$$W_l = \frac{d_{1m} - d_{2m}}{2},$$

где  $d_{1m}$  и  $d_{2m}$  - диаметры вала до и после испытаний в месте износа, мм.

$$\text{Линейный износ втулки} \quad W'_l = \frac{d_{1am} - d_{2am}}{2},$$

где  $d_{1am}$  и  $d_{2am}$  - диаметр втулки до и после испытаний, мм.

Среднюю линейную интенсивность изнашивания вала и втулки находят по формулам:

$$I_{cp} = \frac{W_t}{L_a}, \quad I'_{cp} = \frac{W'}{L_a},$$

где  $L$  - путь трения скольжения вала и втулки

за время работы  $t$  мин, вычисляемы по методике прил. 2,

$W_t$ ,  $W'$  - 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

$$R = \frac{|S| - \epsilon}{(I_{11}L_1 + I_{12}L_2)n},$$

где:

$|S|$  - допустимое смещение вала в направлении действия нагрузки, мм;

$\epsilon$  - радиальный зазор, см;

$I_{11}, I_{12}$  - 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:  $R = \frac{h}{I_1 L_1 n}$ ,

где  $I_1$  и  $L_1$  - соответственно интенсивность изнашивания и путь трения для точки поверхности, на которую наанесено антифрикционное покрытие.

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

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

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 ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ИЗНАШИВАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ ПО ТОРЦЕВОМУ СЛЫШЬ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ**

5.1. Метод предназначен для испытаний материалов и покрытий, применяемых в подшипниках, подшипниках скольжения и других узлов в атмосфере и вакууме при температурах 300...600К. Состоит в определении коэффициента трения и износстойкости 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 "Грибовак Т-2".

5.2. Требования к образцам должны соответствовать техническим условиям на детали натурного узла трения. При отсутствии подобных ГУ - 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. При этом служит произведение среднего контактного давления на скорость скольжения  $PV$ , наиболее близкое к натуральному.

Применяется оборудование. Испытания проводят на стенде "Грибовак 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-измеритель-

мого устройства для испытаний по торцевой схеме представлена на рис. 5. Испытуемые образцы - кольцо (1) и контробразец (2) расположены в камере (3). Кольцо опирается на шарикоподшипниковый узел (16) и приводится во вращение через электромагнитную муфту (17) электроприводом. Контробразец (2) закреплен винтом на штоке (15).

Нагрузка между контробразцом и кольцом создается штоком (15), расположенным в опоре (5). У штока имеется чашка (6), в радиальные прорези которой вставлена тензобалка (7), входящая центральной частью в прорезь толкателя (12), расположенного во фланце (8) камеры (3). Толкатель герметично соединен с фланцем сильфоном (9). Нагрузка на него передается с помощью рычажного механизма (10) грузами (11). На тензобалку наклеены тензодатчики (14) для замера сил трения между образцами. На фланце камеры размещены гермовводы (13) для вывода из камеры проводов тензодатчиков, термопары и нагревателя образцов, а также датчики давления (4) ПМТ-2 и ПМ-2. Камера через вентиль  $\Delta\text{У}-100$  подключается к откачному агрегату ЭРА-300-2.

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

#### 5.6. Проведение испытаний.

5.6.1. 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, заусенец 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.

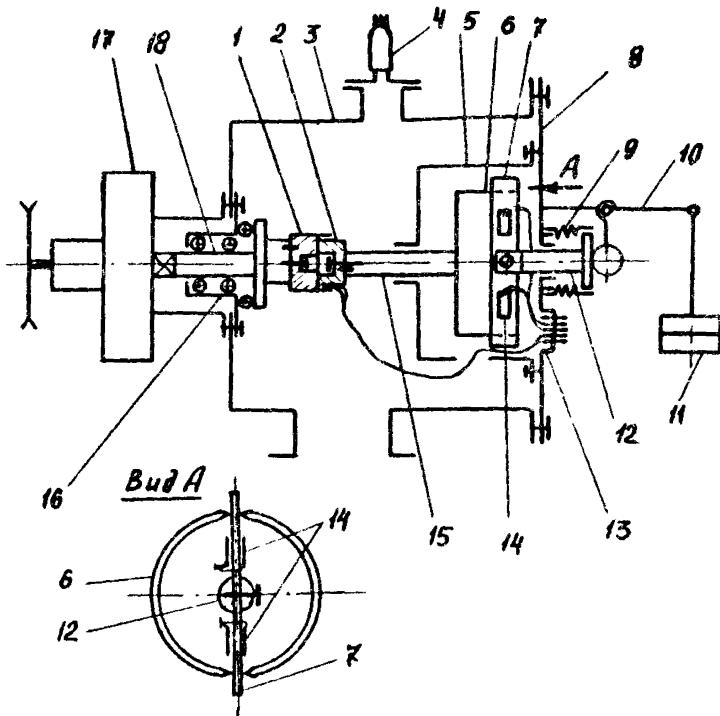


Рис. 5. Схема камеры трения и нагрузочно-измерительного устройства

I - подвижный, 2 - неподвижный образцы; 3 - камера трения;  
 4 - датчики давления ПиТ-2 и ПИИ-2; 5 - кожух; 6 - чашка;  
 7 - тензопластина; 8 - фланец; 9 - сильфон; 10 - ричаг;  
 11 - груз; 12 - толкатель; 13 - гермовод; 15 - шток;  
 16 - опора; 17 - муфта электромагнитная; 18 - вал

5.5.2. Металлические образцы тщательно промывают бензином (ГОСТ 143-76), затем этиловым спиртом (ГОСТ 5962-67) и промывают воздухом. Для отстирки используют соксы.

Примечание. Образцы не промывают с твердосмазочными покрытиями типа ви.1.кб-209, -212, -213, -230 и т.д. растворителями не промывать!

5.5.3. Взвешивают образцы на аналитических весах АДВ-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 поверхности не допускаются).

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

Откачивают камеру пэтапно: сначала цеолитовым насосом до  $5 \cdot 10^{-4}$  Па, затем магниторазрядным насосом и азотным экраном до величины  $\leq 10^{-5}$  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 горцевых поверхностей, частота вращения, нагрузка, давление окружающей среды.

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

5.5.11. 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 засорения в трущемся 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 Г-1" (прил. 7) или другими (см. п. 5.4) средствами.

### 5.6. Обработка результатов

5.6.1. Коэффициент трения вычисляют по формуле

$$f = \frac{Kz}{Nr},$$

где  $K$  - градуировочный масштаб шкалы прибора (ЛСП-4);

$z$  - число делений на нем, соответствующее измеряемому моменту трения, дел.;  $N$ -нормальная нагрузка на образцах, Н;

$r_t$  - радиус трения пары, см.

$N = aQ$  при атмосферных испытаниях;  $N = aQ + P_b$  при вакуумных испытаниях, где  $a$  - соотношение плеч рычажного механизма нагрузки;  $Q$  - вес подвешиваемого груза, Н;

$P_b$  - сила, действующая на образец через сильфон, Н.

$$r_t = \frac{d_{in} + d_{out}}{4},$$

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

5.6.2. Линейный износ кольца определяют из выражения:

$$W_t'' = h_1'' - h_2'',$$

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

5.6.3. Линейный износ контробразца

$$W_t^{cr} = h_1^{cr} - h_2^{cr},$$

где  $h_1^{cr}$  и  $h_2^{cr}$  - 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

$$I_m = \frac{W_m}{L_m}, \quad I_{cr} = \frac{W_m'}{L_{cr}},$$

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

$$L = 2\pi r_t n t \cdot 10^2, \text{ м},$$

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

$t$  - время испытаний образцов, мин;  $r_t$  - 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-1 (прил. 7).

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

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

6.1. 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, полу-втулка) 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-1" позволяет использовать образцы разной конфигурации и с различными коэффициентами взаимного перекрытия рабочих поверхностей трения:

6.2.1. Неподвижные образцы: индентор, полувтулка, движущаяся возвратно-поступательно: вал, пластина (табл.2, поз.8, 9,10,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 натуральному. Среднее контактное давление вычисляют по формуле

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

где  $N$  - радиальная нагрузка;  $A_a$  - площадь диаметрального сечения.  $A_a = \frac{\pi}{4} d^2 l$ , 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-1", 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 (1) и полувтулка (2) - вид А, а также пластина (9) и индентор (11) - вид Б.

Вал (1) располагается на опорном столике (3), а полувтулка (2) прикреплена винтом (23) к захвату (10). Закрепленные опорой (3) и захватом (10) образцы устанавливают на плите (7). Плита через улругие подвесы (6) и тензобалки (15) скреплена с блоком (5). Блок расположен на штоке (17), который перемещается возвратно-поступательно от электродвигателя с редуктором и винтового механизма (16).

Нагрузочно-измерительное устройство в виде параллелограммного механизма (20) и тензопластины нагрузки (13) с винтом (12) размещено на фланце (14) камеры (21). Сила трения измеряется с помощью тензопластин (15) с тензодатчиками. После установки образцы нагружают с помощью винта (12) и параллелограммного механизма (20).

При включении электродвигателя и возвратно-поступательном движении блока (5) тензопластины (15) изгибаются и по их деформации оценивается сила трения. Установка "Трибовак ВП-1" позволяет проводить одновременно испытания двух пар образцов.

#### 6.5. Проведение испытаний.

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

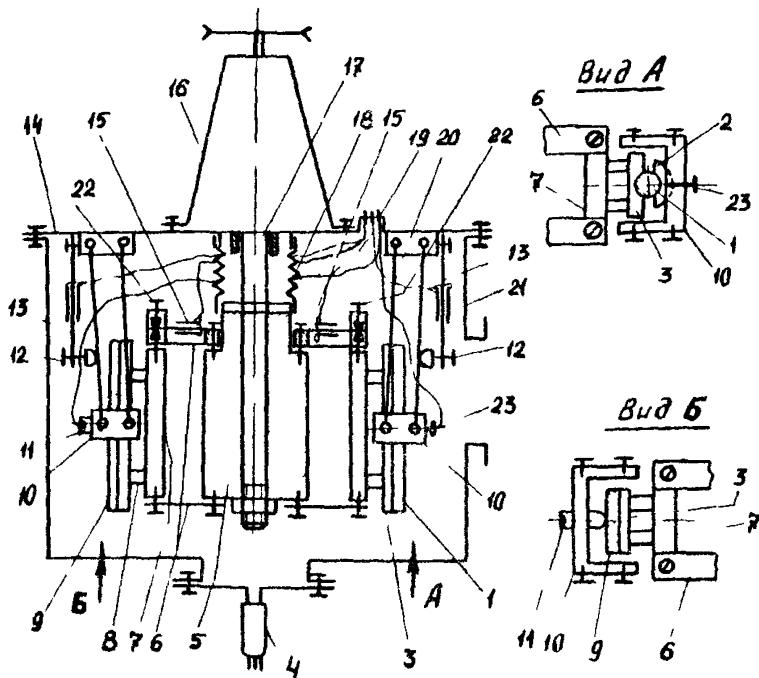


Рис. 6. Схема камеры трения и нагрузочно-измерительного устройства

1 - подвижный образец - вал, 2 - неподвижный образец - полу-  
втулка, 3 - опора, 4 - датчики давления ПМГ-2 и ПМи-2,  
5 - блок, 6 - упругие подвесы, 7 - плита, 8 - стойка, 9 - под-  
вижный образец - пластина, 10 - захват, 11 - неподвижный обра-  
зец - индентор, 12 - винт нагрузки, 13 - тензобалка нагрузки,  
14 - фланец, 15 - тензобалка измерения силы трения, 16 - ме-  
ханизм преобразования вращательного движения в взаимно-  
-поступательное, 17- шток, 18 - сильфон, 19 - гермоввод,  
20 - параллелограммный механизм, 21 - камера трения, 22 - винт  
тензобалки трения, 23 - винт крепления полуятулки к захвату

На контактирующих (трещихся) поверхностях не должно быть раковин, заусениц 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 443-70), 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. б).

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 циркуляционным насосом до  $5 \cdot 10^{-2}$  Па, затем магниторазрядным насосом и азотным экраном до величины  $\leq 10^{-3}$  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-

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

6.5.11. 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 заведения в трущуюся паре.

6.5.12. 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-1" (прил. 7) или другими (см.п.2.4) средствами.

#### 6.6. Обработка результатов

6.6.1. 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-1, 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 (индейтора) - из выражения

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

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

массовая интенсивность изнашивания  $I$  вала (пластины) и полувтулки (индентора)

$$I_{\text{в}(\eta)} = \frac{W_m}{L_{\text{в}(\eta)}}, \quad I_{\eta/\text{в}(\eta)} = \frac{W'_m}{L_{\eta/\text{в}(\eta)}} \cdot \frac{1}{N},$$

где  $L_{\text{в}}$  и  $L_{\eta/\text{в}}$  - пути трения вала и полувтулки

$$L_{\text{в}} = 2bnt = 2bN,$$

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.

$$L_{\eta/\text{в}} = 2LN,$$

где  $L$  - длина хода.

6.6.4. Линейный износ вала

$$W_i = \frac{d_{16} - d_{26}}{2},$$

где  $d_{16}$  и  $d_{26}$  - диаметр вала до и после испытаний в месте износа, мкм.

Линейный износ полувтулки

$$W'_i = \frac{d_{1\eta/\text{в}} - d_{2\eta/\text{в}}}{2},$$

где  $d_{1\eta/\text{в}}$  и  $d_{2\eta/\text{в}}$  - диаметр полувтулки до и после испытаний, мкм.

Средняя линейная интенсивность изнашивания вала и полувтулки

$$I_s = \frac{W_i}{L_s} = \frac{W_i}{2bN}, \quad I_{\eta/\text{в}} = \frac{W'_i}{L_{\eta/\text{в}}} = \frac{W'_i}{2LN},$$

где  $L$  - путь трения соответственно вала и полувтулки, мкм за время работы, мин.  $W_i, W'_i$  - их максимальный линейный износ, мкм.

При наличии на вале тонкослойного смазочного покрытия  $W_i$  - 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

$$P_c = \frac{N}{A_c} \quad \left( \frac{H}{M^2} \right). \quad (1)$$

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 составляет

$$\bar{P} = \frac{P_0}{2 \Gamma \varphi_0} \quad \left( \frac{H}{M^2} \right), \quad (2)$$

где  $P_0 = \frac{N}{l}$  — нагрузка на единицу длины втулки,  $\frac{H}{M}$  ;  
 $\varphi_0$  — половина угла зоны контакта, рад., рассчитываемая по методике прил.2;  $\Gamma$  — 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 (12) и (2);

если неравенство (13) 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)  $K_{\text{ва}} = 1$ . Путь трения одинаков как для вращающегося, так и неподвижного образцов и определяется из выражения:

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

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

б)  $K_{\text{ва}} < 1$ . В этом случае для образца с выступами путь трения  $L_B$  равен той же величине

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

для сплошного контробразца

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

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

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

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

Для каждого из  $K$  образцов путь трения

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

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

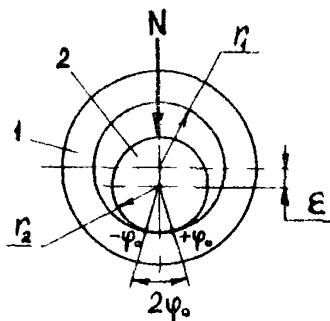


Рис.7. Схема контакта вала и втулки: 1 - втулка; 2 - вал.

## 3. Схема вал-втулка.

а) Вал вращается в неподвижной втулке. Путь трения втулки

$$L_{\text{вт}} = \pi D_b m 10^{-6}, \text{ км}, \quad (8)$$

где  $D_b$  - диаметр вала, мм.

Путь трения вала

$$L_b = \varphi_0 D_b m 10^{-6}, \text{ км}, \quad (9)$$

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

б) Втулка вращается относительно неподвижного вала. Путь трения втулки

$$L'_{\text{вт}} = \varphi_0 D_b m 10^{-6}, \text{ км}. \quad (10)$$

Путь трения вала

$$L'_b = \pi D_b m 10^{-6}, \text{ км}. \quad (11)$$

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

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

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;

$\epsilon = r_1 - r_2$  - радиальный зазор сопряжения.

Формула Герца применима, если выполняется условие

$$[(1 - \mu_1^2) + (1 - \mu_2^2)] \leq 0,092. \quad (13)$$

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.

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

Для разрезной втулки

$$K = \frac{P_0}{E_1 \epsilon} = \psi(\varphi_0), \quad (14)$$

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

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

Множитель  $K$  - функция относительной толщины втулки

$$Y = \frac{r_1}{r_2} \text{ и коэффициента Пуассона } \mu_1. \text{ В случае } \mu_1 = 0,5$$

$$K = \frac{3}{2} \frac{1-Y}{Y}. \quad (15)$$

Для сплошной втулки

$$K = \frac{P_0}{E_1 \epsilon} = \psi_1(\varphi_0), \quad (16)$$

$$\text{где } \psi_1(\varphi_0) = \frac{2\varphi_0 - \sin 2\varphi_0}{\cos \varphi_0} + \frac{4 \sin \varphi_0}{\pi - \varphi_0} (\operatorname{tg} \varphi_0 - \varphi_0),$$

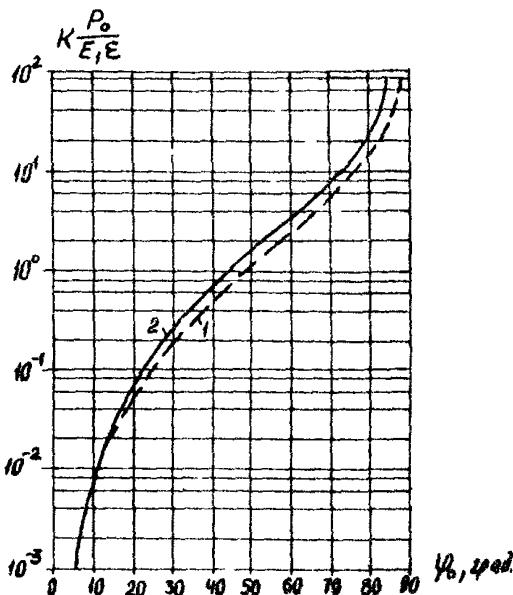


Рис.8. График функций:  $\psi(\varphi_0) = K \frac{P_0}{E_1 \epsilon}$  - кривая I  
 и  $\psi_1(\varphi_0) = K \frac{P_0}{E_1 \epsilon}$  - кривая 2

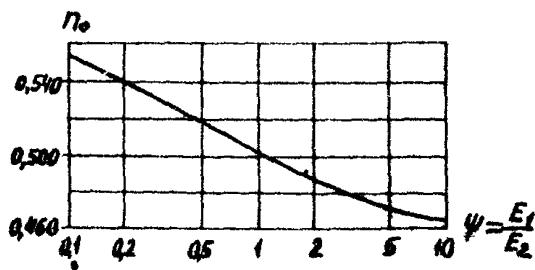


Рис.9. Зависимость  $\eta_0$  от  $\Psi$

а К рассчитывают по формуле (I5).

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

$\Psi > 10^{-2}$  - для подшипников с металлическими вкладышами, а также с тонкими антифрикционными покрытиями.

В этом случае

$$\varphi_0 = C \left( \frac{d}{d+1} \right)^n, \quad (I7)$$

где  $d = \frac{P_0}{E_1 E_2}$ , а показатель степени  $n$  оценивается по формулам табл.4.

Таблица 4

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

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  $\lambda = \frac{d}{r \varphi_0}$ , где  $\delta$  - толщина покрытия. Если  $\lambda < 0,5 - 0,1$ , то  $\Psi$  находят без учета механических свойств покрытия.

Коэффициент С рассчитывают следующим образом:

$$C = 0,32 \left( \frac{C_0}{0,12} - 1 \right)^n, \quad (I8)$$

$$\text{где } C_0 = \frac{4}{\pi} \left[ (1 - \mu_1^2) + (1 - \mu_2^2) \Psi \right].$$

Формула (I7) с учетом (I8) принимает вид

$$\varphi = 0,32 \left[ \left( \frac{C_0}{0,12} - 1 \right) \frac{d}{d+1} \right]^n \quad (I9)$$

3. Градуировка нагрузочно-измерительного устройства  
стенда "Трибовак Т-1"

Так как испытания проводят при постоянных нагрузках (2,5Н на каждый индентор по пальчиковой схеме и 7,5Н - по торцевой) обычными гирями, то градуировка подвергается лишь тензобалка измерения силы трения (5) с наклеенными тензодатчиками (6) рис.10.

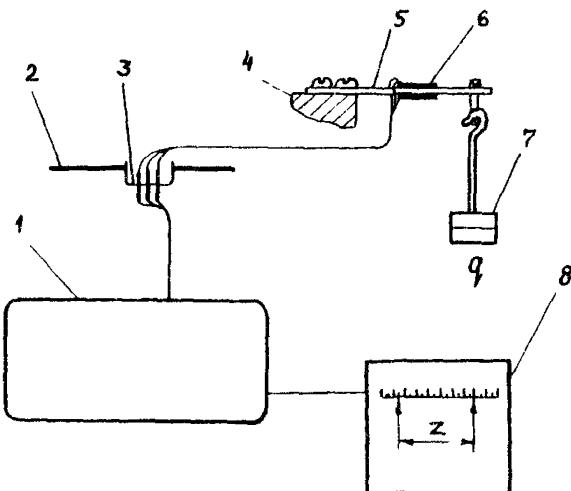


Рис.10. Схема градуировки НИУ торцевой камеры трения:  
1 - тензоусилитель, 2 - нижний фланец камеры трения, 3 - гермоввод, 4 - опора тензобалки, 5 - тензобалка измерения силы трения, 6 - тензодатчик, 7 - груз имитации силы трения, 8 - регистрирующий прибор (КСП-4)

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 не закрепленном 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 установленному 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-І"

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

Устройство подвешивают на подвесе (10) 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 (13), к концу которого подвешивают поочередно грузы  $g$  (16), 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 (14) и самопишущим прибором (15).

Величину градуировочного груза  $g$  вычисляют из равенства момента трения между валом и втулкой и градуировочного момента:  $fGr = gL$ , где  $f$  — коэффициент 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  $L = 100$  мм,  $r = \frac{d}{2} = 5$  мм,  $g = 0,05 fG$ .

Вид A

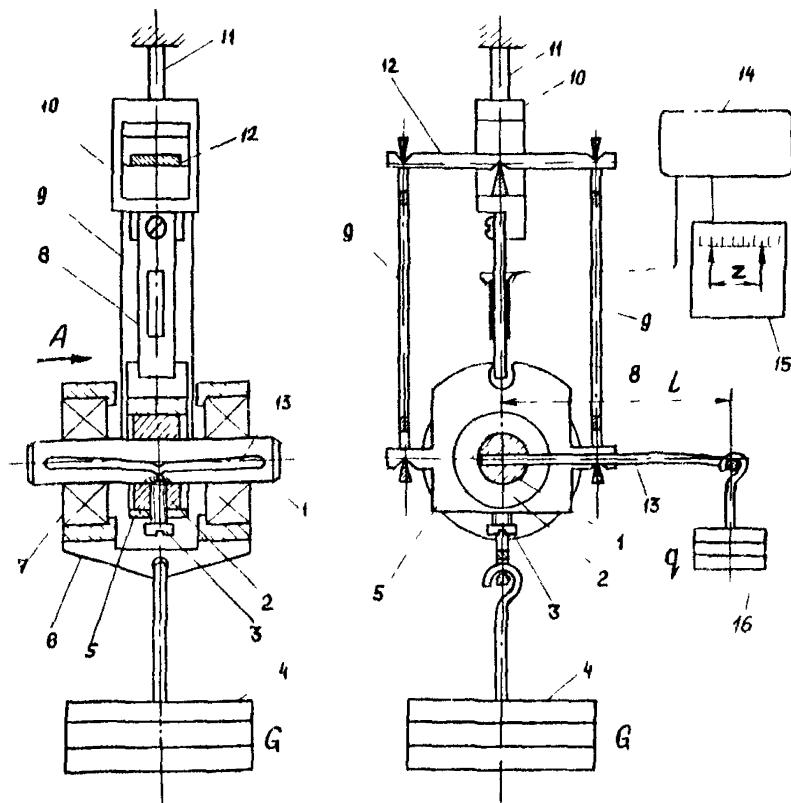


Рис. II. Схема градуировки НИУ камеры трения вал-втулка

1-вал; 2-втулка; 3-винт, скрепляющий вал, втулку и обойму;  
4-груз нагрузки; 5-обойма; 6-трансверса; 7-подшипники; 8-теп-  
забалка; 9-тяги; 10-подвес; 11-шток; 12-коромысло; 13-ручаг;  
14-теноусилитель; 15-регулирующий прибор; 16-грузы имита-  
ции момента трения

Таблица 5

$g, H$	$Z, \text{дел.}$	$f$	Примечания
	5	0,05 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5	

Градумировку проводят в диапазоне сжимаемых 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 градумировочные моменты, соответствующие разным коэффициентам трения  $f$ , и записывают в табл.5 значения  $Z$  с регистрирующим трение прибора КСП-4.

Вычисляют градумировочный 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. 12.

К штоку (?) прикреплен двухплечий рычаг (21), 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 ВАНЧ-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:

$$fN_r = 2qL,$$

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

При  $P_a = 500 \text{ Н/см}^2$

$$S = \frac{\pi}{4} (1,8^2 - 1,0^2) = 1,76 \text{ см}^2 \text{ и}$$

$$N = P_a \cdot S = 500 \cdot 1,76 = 880 \text{ Н};$$

$$r_t = \frac{1,8 + 1}{4} = 0,7 \text{ см}; \quad L = 6,5 \text{ см};$$

$$f = \frac{2qL}{Nr_t} \quad \text{для } q = 20 \text{ Н, } f = \frac{2 \cdot 20 \cdot 6,5}{880 \cdot 0,7} = 0,42.$$

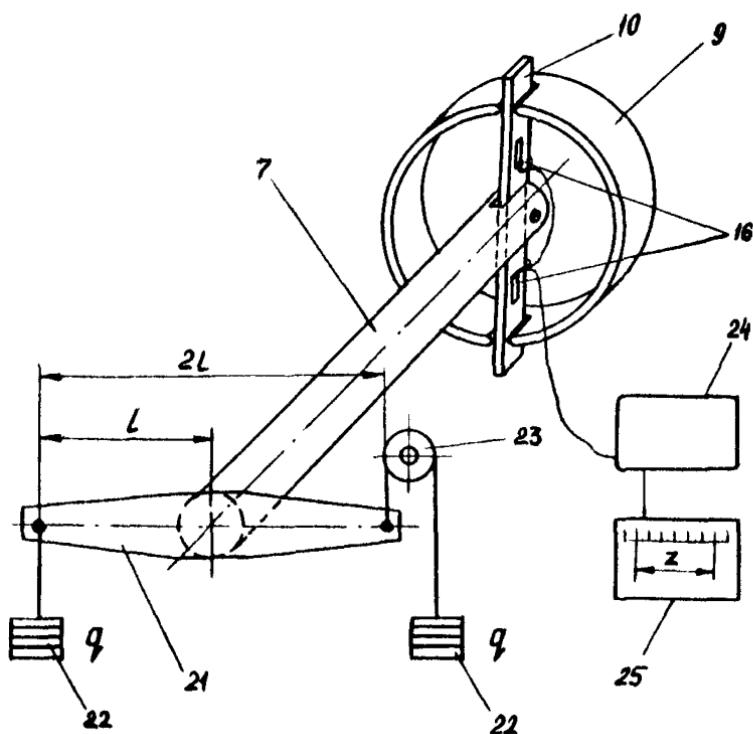


Рис 12. Схема градуировки нагрузочно-измерительного устройства стенда "Трибовак Т-2"

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 трения прибора KCH-4.

Вычисляют градуировочный масштаб трения шкалы прибора

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

## 6. Градуировка нагрузочно-измерительного устройства стенда "Трибовак ВП-1"

Схема градуировки НИУ представлена на рис. 13.

Градуировку тензопластин нагрузки проводят в ожидаемом диапазоне в следующем порядке.

Закрепляют на опоре (16) тензобалку нагрузки (13) с наклеенными тензодатчиками.

Соединяют тензодатчики с полумостом тензоусилителя ВАНЧ-7М (11), с которого подается сигнал на регистрирующий прибор КСП-4 (12).

Включают на прогрев (30 мин) приборы ВАНЧ-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

$$K_1 = \frac{N}{Z_1}, \quad (N = G), \\ (\text{например } K_1 = \frac{18,3}{30} = 0,62 \text{ кгс/дел.}).$$

Для градуировки тензопластины силы трения (8) подвешивают груз  $Q$  к отверстию подвижного образца (1). 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  $K_2$

$$K_2 = \frac{F}{Z_2}, \quad F = Q \quad (\text{например } K_2 = \frac{12}{40} = 0,3 \text{ кгс/дел.}).$$

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

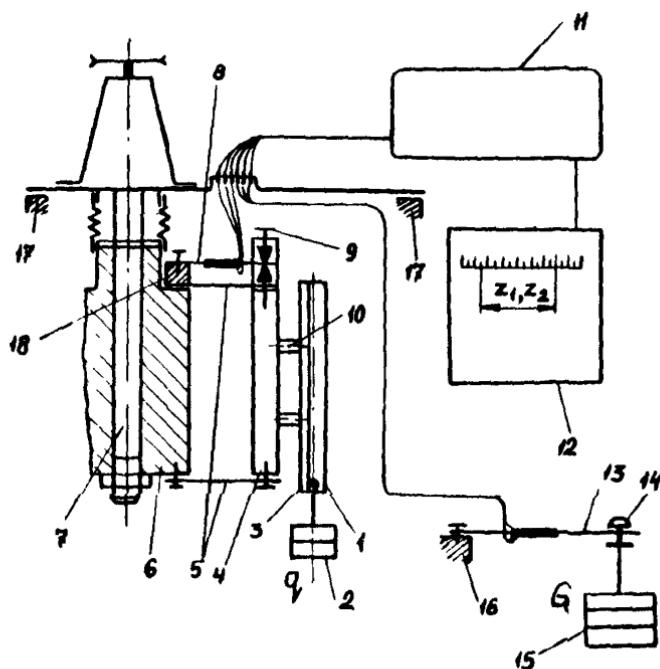


Рис. 13. Схема градуировки НИУ камеры трения с возвратно-поступательным движением:

1-подвижной образец - вал, 2-груз имитации силы трения, 3-опора, 4-плита, 5-упругие подвесы, 6-блок, 7-шток, 8-тензобалка измерения силы трения, 9-винт тензобалки силы трения, 10-стойка, 11-теноусилитель, 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-1 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 (11) и омметра (12). Механотронный датчик с наконечником (10) и иглой (4), закрепляемой винтом (18) на упругом подвесе (17), установлены на стойке (7). На основании (1) расположена призма (2), на которой поочередно размещаются плитка (плоско-параллельная мера) (14) из набора концевых мер (ГОСТ 9038-59) и образец (3) с покрытием (15) толщиной  $h$  мкм. Рабочее положение механотрона регулируется микрометрическим винтом (8), а нулевой уровень иглы и наконечника винтом (6). Винтами (5) и (13) 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 (14). Их общая толщина должна равняться приблизительно высоте образца с призмой.

Вращением микрометрического винта (8) подвести наконечник механотрона (10) к плитке (может быть рассогласование между иглой (14) 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. III).

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

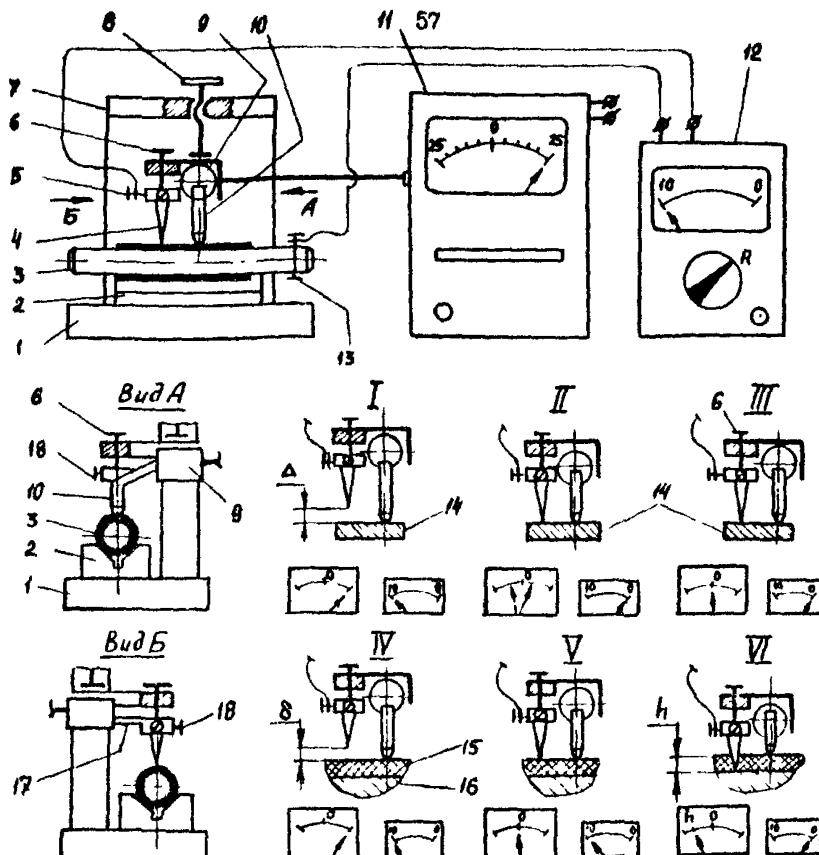


Рис.14. Схема прибора ИТ-И для измерения толщин покрытий и принцип его работы:

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, 10-наконечник механотрона, 11-прибор БВ-3040У, 12-омметр, 13-винт контакта, 14-плоскоизогнутая мера, 15-твердое смазочное покрытие, 16-подложка (образец), 17-упругий подвес иглы, 18-винт крепления иглы,  $\Delta$  - рассогласование между иглой и наконечником до установки "нулевого уровня",  $\delta$  - рассогласование между иглой и наконечником при "нулевом уровне",  $h$  - толщина твердого смазочного покрытия.

I, II, III - настройка прибора, IV...VI - 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", IV - положение иглы и наконечника до измерения, V "нулевой уровень" перед измерением толщины покрытия, VI - положение иглы и наконечника в конце измерения

к поверхности покрытия ( $\theta$  - рассогласование между иглой и наконечником при нулевом уровне), присоединить омметр к образцу и меканотрону (поз.ІУ). 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.УІ).

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  $\bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i$ .

Несмешенная 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 ( $\geq 5$ ) - по табл. 2 ГОСТ И.004-74.

Результаты измерений коэффициента трения

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

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

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\bar{f}} \cdot 100\%$$

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 пок-  
рытия

Разработчик

Изготовитель

Дата изготовления

Условия испытаний

среда \_\_\_\_\_

давление окружающей среды \_\_\_\_\_ Па

нормальная нагрузка \_\_\_\_\_ Н

номинальное давление на площадь контакта \_\_\_\_\_ Н/мм<sup>2</sup>

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	<i>min</i>													
	<i>средн</i>													
	<i>max</i>													
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	$F$	$N$
Момент трения	$M$	$N \cdot m$
Изонос		
линейный	$W_l$	$m$
массовый	$W_m$	$kg$
объемный	$W_v$	$m^3$
Интенсивность изнашивания	$I$	—
Путь трения	$L$	$m$
Время испытаний	$t$	час
Технический ресурс	$R$	$s, m, циклы$
Нормальная нагрузка	$N$	$N$
Удельное давление (номинальное)	$P_a$	$Pa (N/m^2)$
Площадь касания (контакта) номинальная	$A_a$	$m^2$
Площадь контакта контурная	$A_c$	$m^2$
Диаметр вала	$D$	$m$
Диаметр втулки	$d$	$m$
Параметр шероховатости	$R_a$	$μm$
Толщина покрытия	$h$	$μm$
Скорость скольжения	$V$	$m/s$
Контурное давление	$P_c$	$(N/m^2)Pa$
Давление окружающей среды	$P$	$Pa$
Температура среды	$T_c$	$K$
Температура испытаний	$T_{исп}$	$K$
Средняя температура поверхности	$T_p$	$K$

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ

РАЗРАБОТАНЫ Институтом машиностроения АН СССР им.А.А.Благородова (ИМАШ)

## ИСПОЛНИТЕЛИ:

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

УТВЕРЖДЕНЫ Приказом ВНИИМаш № 23 от 03.02.1988 г.

## ВВЕДЕНЫ ВНЕРВИЕ

## 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.
1. Основные положения .....	3
2. Классификация конструктивных схем и машин трения .....	5
3. Метод технологического контроля триботехнических характеристик материалов и твердосмазочных покрытий .....	14
4. Метод определения коэффициента трения и интен- сивности изнашивания материалов и покрытий по схеме вал-втулка вращательного движения .....	19
5. Метод определения коэффициента трения и интен- сивности изнашивания материалов и покрытий по торцевой схеме вращательного движения .....	23
6. Метод определения коэффициента трения и интен- сивности изнашивания материалов и покрытий по схеме вал-втулка возвратно-поступательного движения .....	33
Приложения. ....	40
1. Расчет давления на площадь контакта .....	40
2. Определение путей трения сопряженных деталей ..	41
3. Градуировка нагрузочно-измерительного устрой- ства стенда "Трибовак Т-1" .....	47
4. Градуировка нагрузочно-измерительного устрой- ства стенда "Трибовак В-1" .....	48
5. Градуировка нагрузочно-измерительного устрой- ства стенда "Трибовак Т-2" .....	51
6. Градуировка нагрузочно-измерительного устрой- ства стенда "Трибовак-ВП-1" .....	54
7. Измерение толщины тонкослойных антифрикцион- ных 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.**

**ВНИИМаш Госстандарта СССР**

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