

М 194655

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

КУЗНЕЦОВ Юрий Андреевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА В КИНЕМАТИЧЕСКИХ
ПАРАХ КАЧЕНИЯ С УСКОРЕНИЕМ
(БЕЗ УЧЕТА И С УЧЕТОМ СМАЗКИ)**

(05.02.04 — Трение и износ в машинах)

Диссертация написана на русском языке

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**



1194655

Кузнецов Ю.А. Исследования

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н. Э. Баумана.

Научные руководители:

Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор В. А. Гавриленко, кандидат технических наук, доцент А. А. Савелова.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Бургвиц А. Г.; кандидат технических наук, старший научный сотрудник В. Ф. Решиков.

Ведущее предприятие — завод полимерного машиностроения им. Л. Б. Красина, г. Кострома.

Автореферат ра

1973 г.

Защита диссер

г.

на заседании Со
вета Московско
Н. Э. Баумана п
ул., д. 5.

ль-
им.
ая

Ваши отзывы
ные печатью, пр

ен-

С диссертаци
за 10 дней до з

ТУ

Ученый секре

к. т.

бов.

М194655

55946111

На современном этапе развития техники вследствие роста производительности труда и интенсификации производства изучение законов износа, трения и смазки становятся особо актуальными, так как они связаны с проблемами надёжности, долговечности и стабильности работы. Главной тенденцией современного машиностроения является увеличение скоростей, ускорений звеньев кинематических пар. Существующие методы расчета износа, трения и смазки в подавляющем большинстве случаев учитывают из кинематических параметров лишь скорость относительного движения. Поэтому необходимо выяснить влияние на износ, трение и смазку вторых (и более высоких) производных от перемещения по времени. Так например, в резательной машине шинного производства модели 586-8, пара качения "ролик-направляющая" работает в условиях качения с ускорением без смазки. Направляющая интенсивно изнашивается по обоим концам возвратно-поступательного пути роликов. Эти участки соответствуют малой скорости и большому ускорению.

Актуальность изучения смазки при качении с ускорением диктуется фактом существования обратной связи между толщиной слоя смазки и износом поверхностей взаимодействующих тел. Однако в эластогидродинамике внешне касающихся цилиндров при качении с ускорением отсутствует зависимость толщины слоя смазки от параметров трения. Примером пары, работающей в указанных условиях может служить пара качения "ролик-кулачок" в механизме газораспределения автомобильного двигателя Я МЗ 236-Б.

На основе полученных автором результатов даны рекомендации по улучшению условий работы механизмов с высшими кинематическими парами для указанных случаев.

Требуется дальнейшая экспериментальная проверка положения, высказанного рядом ученых, что величина износа поверхностей не пропорциональна удельной работе трения (как со смазкой, так и без неё).

Реферируемая работа, посвященная решению упомянутых выше задач и состоящая из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка использованной литературы, включающая 93 названия, представлена на 129 страницах машинописного текста, 35 рисунках и 15 таблицах.

В П Е Р В О Й Г Л А В Е приведен обзор работ по исследованию износа и дана постановка задач исследования, а именно:

- 1) аналитическое и экспериментальное определение толщин масляной пленки применительно к парам качения "ролик-кулачок", работающим в условиях "чистого" качения с ускорением при малых нагрузках.

2) исследование влияния на износ при качении со смазкой и без нее различных факторов: нагрузки, скорости, ускорения, работы трения и т.д., применительно к условиям трения в паре "ролик-направляющая" в машине 586-8 шинного производства, каретка которой совершает возвратно-поступательное движение.

Обзор теоретических работ по гидродинамической теории смазки позволил установить, что во-первых, отсутствует зависимость для нахождения h_0 при качении с ускорением; во-вторых, приближенные и точные решения системы исходных уравнений гидродинамики для неустановившегося движения (движения с ускорением) вязкой смазки, выполненные применительно к трению скольжению (А.Г.Бурговиц, А.Т.Полецкий, С.М.Тарг), заканчивались нахождением распределения гидродинамического давления вдоль слоя, выразить из которого h_0 не представляется возможным.

Анализ работ по износу твердых тел в условиях динамики показал малочисленность работ по исследованию влияния различных факторов на износ. Графики зависимости износа от скорости относительно движения, как правило, получены на основе экспериментов, проводимых в статических условиях, когда величина относительной скорости изменялась ступенчато и замер износа производился на каждой ступени. В ряде случаев такая зависимость износа от скорости использовалась при расчете пар трения, работающих с ускорением, что приводит к неточным результатам, т.к. процесс трения, а следовательно и износа, при переменной скорости физически неадекватен процессу трения (износа) при постоянной скорости. Об этом свидетельствуют эксперименты по исследованию внешнего трения - И.В.Крагельского, Д.М.Толстого, М.Е.Эльясберга, А.В.Чичинадзе, Ден-Гартога и Ормондрода, А.Мацусаки, Н.М.Лисицына, Г.М.Кудлыка, О.С.Темиша, а также исследования износа - П.А.Каргина, Н.Х.Лонга, С.Д.Осиповой.

Таким образом, ~~на основании~~ диссертационной работы является:

- разработка методики экспериментальных исследований износа и толщины масляной пленки при качении с ускорением в условиях трения, характерных для выбранных пар типов - "ролик-кулачок" и "ролик-направляющая";

- изучение износа при равномерном и ускоренном качении. Подбор износостойкой пары для резательной машины шинного производства;

- решение плоской задачи эластогидродинамики при "чистом" качении с ускорением абсолютно жестких цилиндров (вывод теоретиче-

ской зависимости минимальной толщины h_0 масляной пленки от условий трения в диапазоне малых скоростей и нагрузок;

- экспериментальная проверка возможности применения критерия "работы трения" в оценке износа пар качения.

ВТОРАЯ ГЛАВА посвящена непосредственному решению плоской задачи эластогидродинамики при "чистом" качении с ускорением абсолютно жестких тел.

Система исходных уравнений гидродинамики принималась в виде:

$$\frac{1}{\nu_0} \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{M} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} ; \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (I)$$

где ν_0, M - соответственно коэффициенты кинематической и динамической вязкости смазки; u, v - компоненты скорости частицы смазки, направленные соответственно по осям Y и X (см. рис. I); P - гидродинамическое давление в смазочном слое.

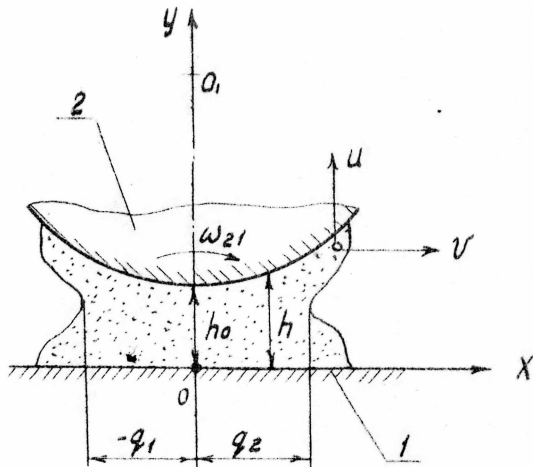


Рис. I. Схема "чистого" качения в условиях смазки абсолютно жесткого цилиндра по плоскости.

Форма зазора между контактирующими телами описана уравнением параболы.

Система уравнений (I) дополнена уравнением движения центра масс верхнего цилиндра

$$m \frac{d^2 h_0}{dt^2} = -G + \ell \int_{-q_1}^{q_2} p dx \quad (2)$$

где m - масса верхнего цилиндра 2, $G = mg$ - его сила тяжести, ℓ - длина образующей цилиндров.

Для выражения гидродинамического давления $P = P(t)$ через его толщину, необходимо решить систему уравнений (I, 2). Для интегрирования этой системы был применен метод осреднения, использованный в работах С.М.Тарга. Для этого ускорение $\frac{du}{dt}$ заменено его средним значением по толщине слоя:

$$\frac{1}{V_0} \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{b h_0^2}{V_0 h^3} \int_0^h \frac{\partial u}{\partial t} dy \quad (3)$$

Введенный здесь безразмерный коэффициент " b " формы масляного слоя позволил: во-первых, учесть изменение границ масляного слоя в направлении оси X ; во-вторых, существенно упростить нахождение функции $P = P(t)$. Коэффициент " b " был представлен в виде:

$$b = \int_{-q_1^*}^{q_2^*} \left[\int_{-q_1^*}^{q_2^*} (1 + x^{*2})^2 dx^* \right] dx^* \quad (4)$$

в выражении (4) границы существования смазочного слоя q_1, q_2 и текущая координата X даны в безразмерном виде:

$$q^* = \frac{q}{\sqrt{\frac{h_0}{\alpha}}} ; \quad X^* = \frac{X}{\sqrt{\frac{h_0}{\alpha}}} \quad , \quad (5)$$

где $\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$ - приведенная кривизна тол. (6)

Для решения системы уравнений (1,2) были взяты следующие граничные условия:

$$\begin{aligned} y=0, \quad u=0, \quad v=0, \\ y=h, \quad u=\omega_{21}\alpha x^2, \quad v=-\omega_{21}x, \\ x=-q_1, \quad \partial P/\partial x=0, \quad P=0, \\ x=q_2, \quad P=0, \end{aligned} \quad (7)$$

где ω_{21} - относительная угловая скорость.

В результате решения этой системы была получена зависимость гидродинамического давления $P=P(t)$ от параметров трения. После подстановки её в уравнение (2), последнее было представлено в виде:

$$\frac{d^2 h_0}{dt^2} = -980 + \left\{ \frac{0,78 \mu \omega_{21}}{m \alpha^2 h_0} + \frac{5,2 \rho \dot{\omega}_{21} h_0}{2 m \alpha} \right\} \quad (8)$$

где $\dot{\omega}_{21} = d\omega_{21}/dt$; ρ - плотность смазки.

Уравнение (8) было решено численным методом с использованием ЭВМ "Наири-С" для двух различных условий трения:

1) условия работы пары "ролик-кулачок" в двигателе ЯМЗ-236Б;
2) произвольные условия трения, где ω_{21} и $\dot{\omega}_{21}$ подчиняются закону изменения угловой скорости и углового ускорения ведомого звена механизма антипараллелограмма, причем взять два случая циклового изменения относительной угловой скорости:

$\omega_{21} = 1,5 + 15$ I/сек. и $\dot{\omega}_{21} = 150 + 1500$ I/сек.

Результат решения уравнения (8) для первого случая показан на рис. 2а, для второго - на рис. 2б.

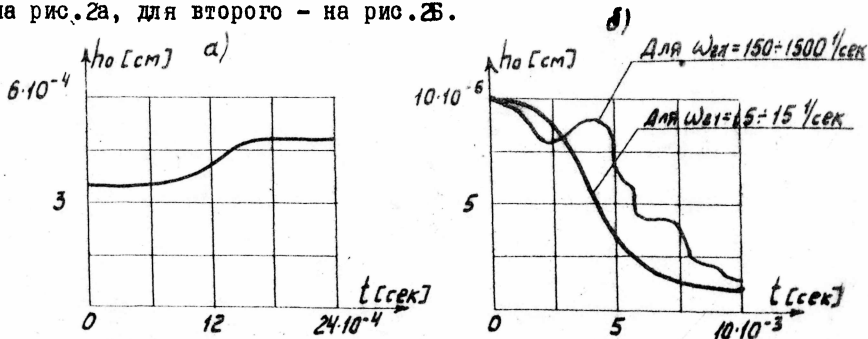


Рис. 2. Зависимость h_0 от времени t части цикла изменения относительной угловой скорости ω_{21} в паре качения "ролик-кулачок" (а); в произвольных условиях трения (б).

Как видно из рис. 2 влияние ускорения на h_0 проявляется лишь при больших относительных угловых скоростях, например при $\omega_{21} = 150 + 1500$ 1/сек. В этом случае нарушается пропорциональность между h_0 и ω_{21} и изменение h_0 приобретает характер колебательного процесса.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ дано описание проведенной автором модернизации машины трения МИ-1М, использованной в качестве экспериментальной установки, а также приведены методики и результаты экспериментальных измерений износа, измерения угловых скоростей, угловых ускорений и толщины масляной пленки.

Для создания качения образцов с ускорением были применены механизм антипараллелограмма и оригинальный кулачковый механизм. Первый из них позволил получить большой перепад скоростей ($\omega_{21max}/\omega_{21min} = 10$) и следовательно получить большие ускорения, второй - создать вращение с любым законом изменения скорости или ускорения. Профиль кулачка рассчитывался на ЭВМ.

Экспериментальные образцы представляли собой цилиндрические ролики диаметром 50 мм, шириной 10 мм, которые были изготовлены из стали, чугуна и текстолита. Шероховатость поверхностей качения составляла $\nabla 5$, $\nabla 6$, $\nabla 7$.

Измерение переменных и постоянных угловых скоростей роликов производилось при помощи тахогенератора ТМГ-30, жестко соединявшегося с валом верхнего образца, и осциллографа Н-102. Тарирование осциллограммы осуществлялось путем записи постоянной известной величины.

Вычисление работы трения при фрикционном качении с постоянной скоростью производилось по формуле

$$A_{ф.к.} = K P \omega_{21} t$$

где K - коэффициент трения качения; P - нормальная нагрузка; ω_{21} - относительная угловая скорость; t - время опыта.

Коэффициент трения качения определялся из выражения

$$K = \frac{M_{тр}}{P}$$

где $M_{тр}$ - экспериментальный момент трения.

Экспериментальный коэффициент трения качения например в условиях $P = 50$ кг, $\omega_{21} = 17,8$ 1/сек для образцов чугун-сталь с трением без смазки получился равным $K = 10^{-4}$ м. Для обильно смазываемых поверхностей найден в тех же условиях $K = 2 \cdot 10^{-4}$ м.

Следовательно, коэффициент трения качения K со смазкой является в два раза больше, чем без смазки.

Работа трения при качении со скольжением в условиях постоянной скорости вычислялась по формуле:

$$A_{\text{кач}} = 2M_{\text{max}} n_p$$

где M_{max} - максимальный момент по шкале моментов трения на машине МИ-ИМ; n_p - число оборотов ролика интегратора на МИ-ИМ за время эксперимента (по счетчику).

В этой группе экспериментов по определению K было взято одинаковое значение работы трения - 1680 кгм, а время опыта определялось числом оборотов ролика интегратора n_p .

Измерение износа было выполнено тремя методами:

1) весовым, 2) вырезанных лунок и 3) повторного профилографирования.

1) Весовой износ выражался в миллиграммах. При фрикционном качении в условиях $\mu = 50$ кг, $\omega = 17,6$ 1/сек, без смазки для образцов чугуна-сталь при $A_{\text{ф.к.}} = 3560$ кгм износ составил 20 мг. При увеличении нагрузки до 117 кг и соответствующем уменьшении относительной угловой скорости до 7,6 1/сек, т.е. с прежним значением $A_{\text{ф.к.}}$, износ составил 70 мг. Следовательно, нагрузка влияет на износ сильнее, чем скорость.

2) Метод вырезанных лунок был использован при экспериментальном исследовании качения со скольжением для выяснения воздействия на износ скорости и ускорения. Для нанесения лунок на узких цилиндрических образцах был использован прибор УИОИ-6, конструкции ИМАШ, г.Москва. Для зацепления на приборе образцов была применена специальная зажимная приставка. Сущность метода вырезанных лунок, разработанного М.М.Хрущовым и Е.С.Берковичем, заключается в измерении длины лунок до и после износа. Величина износа определялась по формуле:

$$\Delta h = 0,015(\ell_1^2 - \ell_2^2)$$

где ℓ_1, ℓ_2 - соответственно длина лунки до и после износа. Износ в этом случае выражался в микронах.

Сущность этой группы экспериментов заключалась в сравнении износа в точках поверхности, характеризующих коэффициентом скольжения λ с износом в тех же точках, характеризующих коэффициентом ускоренного скольжения λ_a . После измерений оказалось что характер изменения износа поверхности соответствует ближе характеру изменения коэффициента λ_a , чем λ .

3) Метод повторного профилографирования заключается в снятии с трущейся поверхности профилограммы - увеличенного профиля поверхности. В наших опытах для этого использовался профилограф "Телиронд" (Англия). Этот метод был использован для выяснения влияния нагрузки и скорости на состояние поверхности трения.

Угловое ускорение верхнего образца, необходимое для вычисления Λ_a было записано при помощи сверхминиатюрного механотронного датчика БИЗБ, установленного на горизонтальном рычаге, вращающемся синхронно с верхним образцом. Питание механотрона осуществлялось от батареи элементов напряжением 10 вольт.

С целью экспериментальной проверки полученного дифференциального уравнения (8) в условиях фрикционного качения с переменной скоростью $\omega_{21} = 6,4 \div 64$ 1/сек при погонной нагрузке 15 кг/см был произведен экспериментальный замер толщины h_0 масляной пленки методом измерения её полного электрического сопротивления. Одновременно с толщиной масляной пленки производилась запись угловой скорости ω_2 верхнего образца (рис.3). В этом и в предыдущих экспериментах использовался осциллограф Н-Ю2. Для создания ускоренного вращения использовался механизм антипараллелограмма.

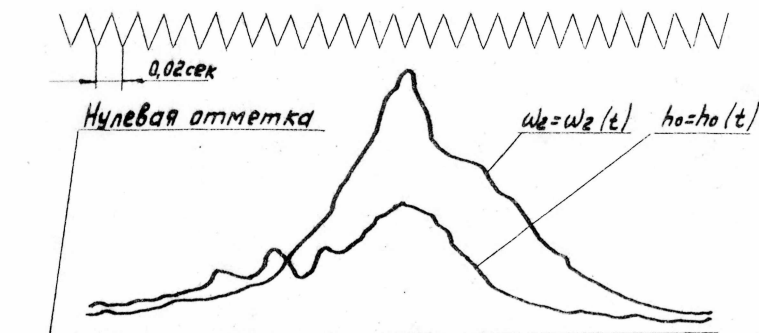


Рис.3. Изменение за цикл h_0 и ω_2 в условиях фрикционного качения при $\omega_{21} = 6,4 \div 64$ 1/сек и погонной нагрузке 15 кг/см.

В заключение главы рассмотрены основные группы погрешностей. Показано, что величина погрешностей оценки износа не превышает 1%.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ приведен анализ полученных результатов.

Аналитическое исследование выведенного дифференциального уравнения (8), выполненное посредством ЭВМ, позволило установить, что для небольших значений переменной скорости и произвольных условий трения как например для $\omega_{21} = 1,5 + 15$ I/сек, цикловое изменение h_0 происходит практически пропорционально ω_{21} , т.е. слагаемое с ускорением не влияет на характер изменения h_0 . Аналогичная закономерность обнаружена и при больших относительных скоростях $\omega_{21} = 150 + 1500$ I/сек, в случае искусственного исключения из уравнения (8) слагаемого с ускорением. Учет же слагаемого с ускорением в уравнении (8) приводит к тому, что цикловое изменение h_0 при $\omega_{21} = 150 + 1500$ I/сек приобретает характер колебательного процесса. Причем частота и амплитуда колебаний h_0 изменяются с изменением абсолютных значений параметров трения (вязкости и плотности смазки, погонной нагрузки, значения относительной скорости и ускорения, кривизны цилиндров). Кроме этого было установлено, что изменение h_0 в паре "ролик-кулачок" в двигателе ЯМЗ-236Б происходит в основном пропорционально ω_{21} , т.е. без резких колебаний. Все эти выводы находятся в соответствии с основными положениями гидродинамики.

Экспериментальное исследование изменения величины h_0 при цикловом изменении ω_{21} в условиях фрикционного качения для диапазона малых скоростей ($\omega_{21} = 6,4 + 64$ I/сек) показало, что h_0 изменяется пропорционально ω_{21} .

Результаты экспериментального исследования взаимосвязи износа с величиной работы трения в условиях фрикционного качения т.е. качения без скольжений и качения со скольжением без смазки при постоянной скорости образцов приведены на рис.4. Знак минус у скорости скольжения означает, что исследуемая поверхность является отстающей. Рабочие поверхности испытываемых пар (сталь 45-чугун СЧ15-32) были обработаны по шестому классу чистоты. Путь трения при нагрузках 30 кг, 50 кг был в 2 раза больше, чем при нагрузках 10 кг, 17 кг. Испытаниям предшествовала приработка трущихся пар в рабочих режимах в течение I часа. Каждое испытание повторялось трижды. Величина износа при фрикционном качении относится к обоим образцам.

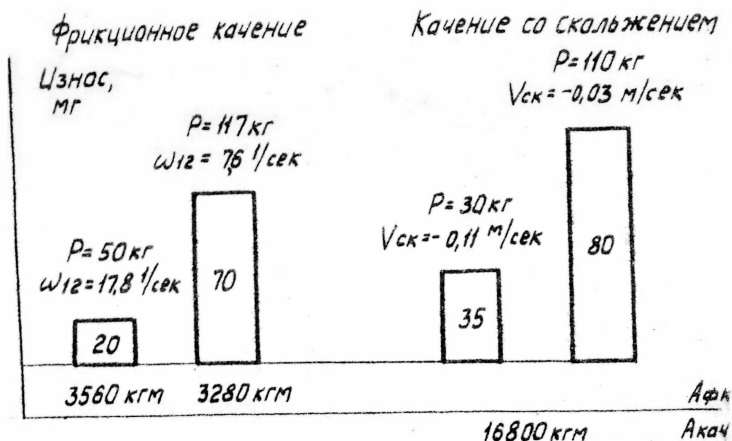


Рис. 4. Износ и работа трения при фрикционном качении и качении со скольжением без смазки при постоянной скорости.

Оказалось, что при одинаковой и даже меньшей затраченной работе трения больший износ наблюдался при большей нагрузке и меньшей скорости, нежели при меньшей нагрузке и большей скорости. Анализ профилограмм поверхностей трения в опытах с фрикционным качением при постоянной скорости, снятых на "Телиронд", показал значительно более сильное повреждение поверхностей при нагрузке 117 кг, чем при нагрузке 50 кг. Следовательно, в исследуемых условиях величина работы трения характеризует износ не однозначно.

Результаты экспериментального исследования износа в динамических и статических условиях трения при качении со скольжением приведены на рис. 5. Скорости скольжения, коэффициенты скольжения и нагрузки на рассматриваемых участках трения (углах поворота образцов) были в обоих случаях равны. Измерение износа производилось на верхнем образце (вращение с ускорением). Как видно из рис. 5 в динамическом режиме трения в основном износ больше, чем в статическом режиме (точки $\varphi = 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 270^\circ, 315^\circ, 360^\circ$). В последнем случае наблюдался более сильный износ отстающих поверхностей нежели поверхностей опережающих. Так например, износ при $V_{ск} = -0,11$ м/сек ($\varphi = 45^\circ$) оказался больше, чем при $V_{ск} = +0,17$ м/сек ($\varphi = 225^\circ$). В опытах использовали чугунные образцы, испытываемые без смазки в течение часа при нагрузке 15 кг

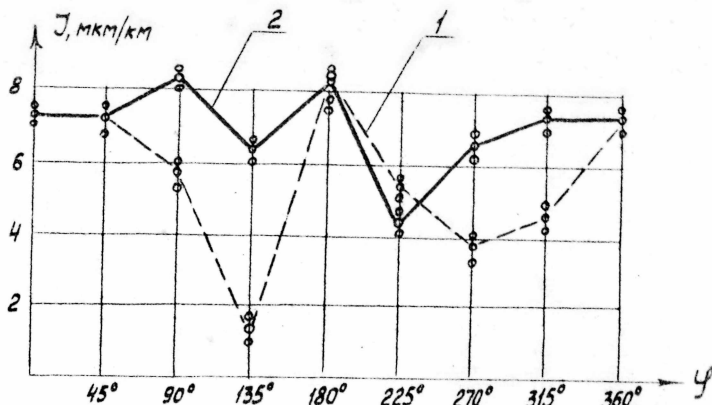


Рис. 5 Износ в статических (1) и динамических (2) условиях трения.

Результаты экспериментов по исследованию износа в условиях фрикционного ускоренного качения без смазки показали, что в механизме режущей каретки машины 586-8 целесообразно использовать пару качения чугунный ролик-стальная направляющая. С целью уменьшения относительного проскальзывания момент инерции ролика относительно его оси вращения должен быть минимальным. Не обнаружено существенного влияния шероховатости поверхностей на износ в этих условиях.

ВЫВОДЫ

I. В результате проведенных теоретических исследований соотношения масляного слоя при "чистом" качении в условиях движения с ускорением абсолютно жестких тел получено дифференциальное уравнение второго порядка, связывающее толщину h_0 масляного слоя с параметрами трения качения: кривизной взаимодействующих тел, нормальной погонной нагрузкой, вязкостью и плотностью смазки, относительной угловой скоростью и угловым ускорением. Анализ этого уравнения с использованием ЭВМ "Наири-С" показал, что:

- при малых переменных относительных скоростях (в нашем исследовании цикловое изменение относительной угловой скорости $\omega_{21} = 15 + 150$ 1/сек а также в случае пренебрежения в полученном уравнении слагаемого с ускорением изменение величины h_0 происходит пропорционально изменению относительной скорости;
- влияние ускорения на h_0 проявляется лишь в диапазоне

больших относительных скоростей (в нашем исследовании диапазон $\omega_{21} = 150 + 1500$ 1/сек), когда критерий Рейнольдса-Струхала $ReSh > 0,1$. В этом случае нарушается пропорциональность между относительной скоростью и величиной h_0 . Изменение h_0 носит характер непериодических колебаний, частота и амплитуда которых определяются конкретными значениями параметров трения качения;

- изменение величины h_0 в условиях работы исследованной пары "ролик-кулачок" (в механизме газораспределения автомобильного двигателя ЯМЗ-236Б) при числе оборотов кулачкового (распределительного) вала $n_k = 1600$ об/мин, происходит практически пропорционально изменению относительной угловой скорости пары, без резких колебаний.

2. Для осуществления экспериментальной проверки некоторых теоретических выводов, а также для изучения взаимосвязи величины износа, скорости и ускорения была произведена модернизация серийной испытательной машины МИ-1М.

При экспериментальных исследованиях установлено, что

- изменение толщины масляной пленки в условиях фрикционного качения с ускорением в диапазоне малых относительных скоростей ($\omega_{21} = 6,4 + 64$ 1/сек) при нормальной погонной нагрузке (15 кг/см) происходит практически пропорционально изменению относительной скорости;

- при фрикционном ускоренном качении ведомый образец в течение цикла непрерывно проскальзывает (отстает или опережает) в соответствии с изменением углового ускорения. Наименьший износ в этой паре наблюдается в случаях, когда осевой момент инерции ведомого образца наименьший;

- в условиях фрикционного качения и качения со скольжением при нагрузках 30 + 117 кг и постоянных скоростях в диапазоне 0,5 + 0,11 м/сек со смазкой и без неё, износ не характеризуется величиной работы трения. В этих условиях равным значениям работы трения, но различным сочетанием величин нагрузок и скорости, соответствует различная величина износа. Причем при качении без смазки более сильное воздействие на износ оказывает силовая нагрузка, а со смазкой - скорость относительного движения;

- кривая износа при ускоренном качении со скольжением более точно соответствует кривой изменения коэффициента ускоренного скольжения, а не кривой изменения коэффициента скольжения;

- для условий работы пары "ролик-направляющая" в резатель-

ной машине 586-8 шинного производства наиболее износостойким сочетанием оказалось чугунный ролик-стальная направляющая.

Материалы диссертации опубликованы в следующих печатных работах:

1. Кузнецов Ю.А. Исследования влияния ускорения на износ трущихся пар в ДРМ, Труды НИИШИНМАШ, выпуск 2, Ярославль, 1971.

2. Кузнецов Ю.А., Берлин Г.С., Бжов Е.Н. Исследование износа направляющей качения диагонально-резательной машины, Труды ВНИИРТМАШ, выпуск 5, 1972.