

## ТРЕНИЕ ЧИСТЫХ МЕТАЛЛОВ И ВЛИЯНИЕ ПОГЛОЩЕННЫХ ГАЗОВ. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОЭФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ<sup>1</sup>

В результате многочисленных исследований эмиссии электронов с поверхности металла, дифракции электронов, а также и оптических исследований твердо установлено, что не только ничем не смазанная поверхность, но и поверхность, очищенная на воздухе, покрыта пленкой окисла, адсорбционной пленкой паров воды и различных газов, одним словом, пленкой загрязнения; толщина ее может быть всего в несколько молекул. Поэтому в экспериментах, связанных с поверхностными явлениями, имеют дело не с чистой поверхностью металла, а с пленкой загрязнения на этой поверхности. Также необходимо иметь в виду, что смазка всегда налагается поверх пленки загрязнения и обычно вытесняет последнюю. Естественно, что пленки загрязнения имеют большое качественное и количественное влияние на трение, так как последнее является процессом, протекающим на поверхности тел.

Пленку загрязнения — обычно весьма тонкую — очень трудно удалить, и поэтому имеется очень немного работ по исследованию трения в вакууме с чисто металлическими поверхностями. Гольм с сотрудниками добились весьма чистой поверхности металла нагреванием в высоком вакууме и установили, что в этих условиях металлы слипаются при контакте, причем в присутствии инертных газов, а также водорода или азота такое слипание не исчезало, но прекращалось при введении кислорода. Далее, Гольм с сотрудниками (см. библиографию в обзорной статье Д. Пеннера, Журнал технич. физики, 10, 265—273, 1940) измеряли величину статического трения методом колебаний и нашли, что когда поверхности металлов дегазированы, т. е. очищены от пленки загрязнения, то сила статического трения велика — гораздо больше, чем при обычных несмазанных поверхностях.

Авторы измеряли коэффициенты динамического (кинетического) трения между тщательно дегазированными металлами и установили, что оно раз в 20 больше, чем при обычных несмазанных поверхностях. Роль введенных затем в вакуум газов сказалась в том, что одни из них уменьшали силу трения, другие оказывали очень малое действие в этом отношении или совсем не действовали. Температура в случае трения чисто металлических поверхностей влияла различно и невоспроизводимо при хотя бы ничтожнейших загрязнениях металлов; если же поверхности были наивозможно тщательно очищены, то результаты получались воспроизводимые и обратимые; в этом случае было установлено, что коэффициент трения медленно, но неуклонно снижался по мере роста температуры.

Авторы вычисляли величину коэффициента динамического (кинетического) трения по отрицательному ускорению (замедлению) скользящего тела, как второй производной пройденного пути по времени из уравнения

$$\frac{d^2S}{dt^2} = -\mu g,$$

где  $\mu$  — коэффициент трения,  $g$  — земное ускорение. Прибор для этой цели представлял собой стеклянную изогнутую вакуумную трубку, изображенную на рис. 1. Скользящее тело представляло собой полый цилиндр в виде манжетки  $C$ , которая могла скользить по продетому через нее стержню из разного металла. Слева видна пружина с раздвоенным нижним концом в виде вилки; эта пружина оттягивалась (каждый раз одинаково) влево при помощи электромагнита  $M$ : когда в последний включался ток, то электромагнит притягивал кусок мягкого железа, вплавленный посредине в пружину  $S$  из стекла-пирекса. Пружина ударяла при выключении тока по цилиндру  $C$ , который предварительно придвигался (если было нужно) и поворачивался вокруг своей оси при помощи маленьких кусочков мягкого железа  $I$ , вставленных в стекло и направляемых снаружи всего прибора при помощи манипуляций с ручным электромагнитом.

По шкале, расположенной параллельно горизонтальному стержню, по которому скользил цилиндр  $C$ , можно было точно отсчитать путь  $S$  скольжения цилиндра. Зная время этого пути  $t$ , можно определить замедление цилиндра вследствие трения, откуда, как выше было показано, легко вычислить коэффициент трения, принимая импульс, получаемый цилиндром  $C$ , за величину постоянную. Горизонтальный стержень — нижняя неподвижная поверхность трения — был подвешен на никелевых петлях  $X$  и  $Y$ ; петли эти позволяли стержню термически расширяться. Ток, пропущенный через стержень от контактов  $X$  и  $Y$ , нагревал стержень и (в условиях высокого вакуума) дегазировал его. Цилиндр  $C$  дегазировался, когда он попадал на рельсы  $R$  справа: в этом положении он нагревался в вакууме потоком электронов от вольфрамовой нити  $F$ , накалявшейся током. Трение измерялось, когда поверхности дегазированных металлов остывали. Вакуум внутри прибора создавался при помощи отвода  $O$  двумя насосами, причем величина вакуума при измерении силы трения поддерживалась постоянной в  $10^{-6}$  м.м.

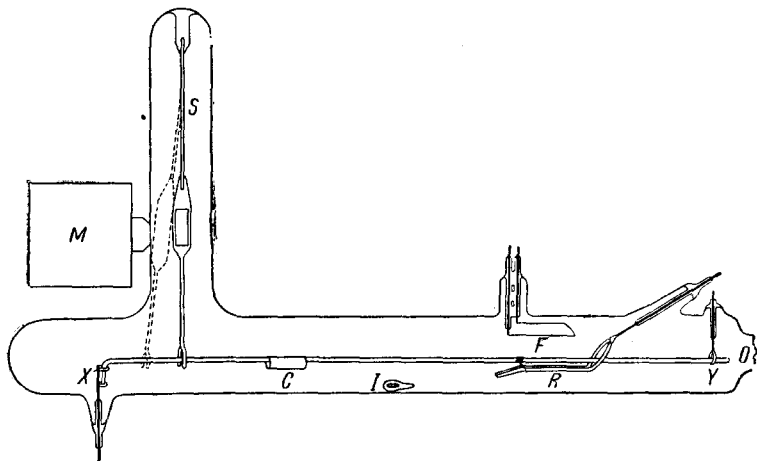


Рис. 1. Прибор для исследования трения

Чтобы вводить в прибор определенный газ, применялись трехходовые краны. Цилиндр  $C$  освещался сбоку, и тень от него проходила в щель камеры, в которой двигалась фотопленка; таким путем получалась кривая путь — время (отметки времени получались при помощи направления на пленку параллельного цилиндру луча, который проходил через диск с делениями, вращавшийся синхронным мотором: таким путем на пленке изображалась серия линий, отмечавших интервалы в 0,003 сек.). Кривая путь — время имела форму параболы, и замедление могло быть рассчитано для любого момента времени графическим дифференцированием. Таким образом, выводился средний коэффициент динамического (кинетического) трения на протяжении всего пути (всего интервала времени) скольжения цилиндра  $C$ .

Прежде всего обнаружилось, что коэффициент трения  $\mu$  (сухого) постоянен в большом интервале скоростей скольжений — от очень малых величин до 100 см/сек. Если сохранять постоянство натяжения пружины  $C$  при каждом толчке, то произведение  $\mu$  на пройденное цилиндром  $C$  расстояние  $l$  оказалось постоянным для данного цилиндра и пружины (т. е. величины импульса — толчка) при различных поверхностях стержня, и поэтому величина коэффициента трения была обратно пропорциональна  $l$ : прибор эталонировался путем измерения произведения  $\mu l$ , а отсюда определялся и коэффициент трения. Рассеяние величин  $l$  при ряде измерений было до 50% при малых значениях  $\mu$ ; когда же  $l$  было мало, т. е. коэффициент трения высок, ошибка была больше.

На описанном приборе Гольмом было исследовано трение никеля по вольфраму, никеля по никелю, меди по меди и золота по золоту. Для первого случая, когда поверхности металлов были «очищены» обычно (на воздухе),  $\mu = 0,3$ . Когда воздух из прибора был эвакуирован,  $\mu$  возросло до 0,5. Когда стержень будет прогрет током (а от него нагрелся и скользящий цилиндр),  $\mu$  увеличилось до 0,7.

Наконец, стержень и цилиндр были отделены друг от друга и накалины до максимально выполнимой в условиях опыта температуры: никель до 1300—1400° К, вольфрам — до 1650° К; затем этим телам давали остыть, устанавливали между ними вновь контакт и быстро измеряли трение: оно оказалось очень большим. Когда подобные эксперименты проделывались несколько раз, то коэффициент трения продолжал все возрастать и через несколько часов достиг максимума (около 6, рис. 2).

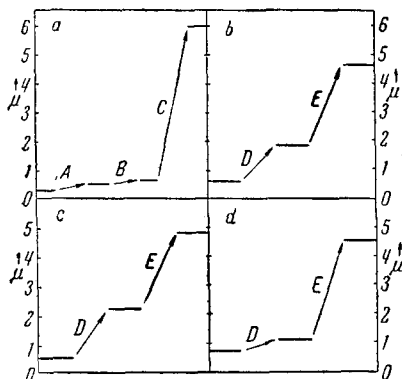


Рис. 2. Влияние дегазации на трение

Скольжение: *a*—никеля по вольфраму, *b*—никеля по никелю, *c*—меди по меди, *d*—золота по золоту. *A*—откачка насосом, *B*—дегазация проволоки, *C*—дегазация проволоки и цилиндра, *D*—дегазация пластины, *E*—дегазация цилиндра и пластины

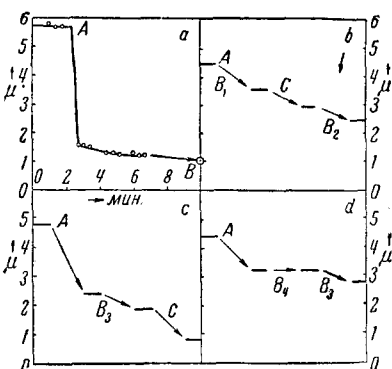


Рис. 3. Влияние кислорода на трение чистых металлов

Скольжение: *a*—никеля по вольфраму, *b*—никеля по никелю, *c*—меди по меди, *d*—золота по золоту. *A*—впуск кислорода (начало), *B*—через 12 час.; *B*<sub>1</sub>—стояние 5 час., *B*<sub>2</sub>—стояние 24 часа, *B*<sub>3</sub>—стояние 16 час., *B*<sub>4</sub>—стояние  $\frac{1}{2}$  часа, *C*—явное образование пленки

Если затем испытывавшиеся дегазированные поверхности оставались при комнатной температуре под вакуумом в  $10^{-5}$ — $10^{-6}$  мм, то коэффициент трения постепенно падал: повидимому, влияло загрязнение поверхностей трения остаточным газом.

В работе имеется указание, что по Лэнгмиору и Вилларсу (1931 г.) пленка окисла на вольфраме разрушается только при нагреве до 1500° К, а позже (1935 г.) К. Лэйтер и Робертс нашли, что эта пленка совсем удаляется лишь при нагреве до 2000° С. Босуэрс и Райдил (1937 г.) определили, что при 1600° К еще 0,3 поверхности вольфрама покрыта его окислом, а ван-Клев (1938 г.) нашел, что пленка окисла быстро удаляется только при 1750° К.

Кривые трения никеля по никелю, меди по меди, золота по золоту при таком же ходе эксперимента, какой был описан выше, показаны на рис. 2.

Когда после описанной процедуры в прибор были введены следы кислорода (при давлении всего в 0,3 мм Нг), то это быстро вызвало падение величины коэффициента трения (рис. 3, по оси абсцисс отложено время). Когда прибор с кислородом внутри оставляли стоять в течение многих часов, трение постепенно еще больше падало, причем выпуск больших количеств кислорода не изменял эффекта. В случае пуска чистого кислорода коэффициент трения не менялся. Когда остаточным газом в приборе являлся

водород, то максимальная величина силы трения устойчиво сохранялась. Тщательно очищенный азот также не влиял на величину трения, но если в азоте имелись хотя бы следы кислорода, то результат получался такой же, как и при одном кислороде. Пары ртути также уменьшали коэффициент трения.

Чтобы определить влияние температуры на трение, нагревали током стержень (его температуру при этом измеряли на расстоянии — оптическим пирометром). Без тщательной дегазации нельзя было добиться определенных, сходящихся результатов влияния температуры на трение: оно могло и возрастать и убывать с температурой (рис. 4).

При весьма тщательной дегазации и высоком вакууме результаты экспериментов становились воспроизводимыми и обратимыми (рис. 5): у всех металлов, кроме золота, трение уменьшалось с повышением температуры. Золото, повидимому, размягчалось с нагревом, что вызывало точечную сварку на большей площади. Вообще, результаты влияния температуры позволяют судить о достаточной чистоте поверхностей.

В большинстве экспериментов после того, как цилиндр прошелся вдоль стержня несколько раз в одинаковых условиях, трение несколько снижалось; это, повидимому, проис-

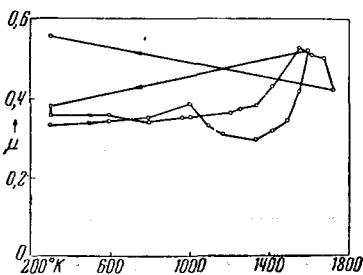


Рис. 4. Влияние температуры на трение между поверхностями никеля и вольфрама, дегазированными не полностью

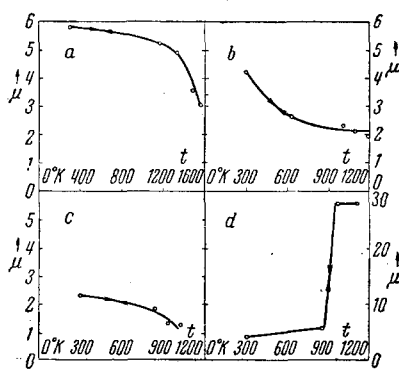


Рис. 5. Влияние температуры на трение между чистыми металлическими поверхностями

Скольжение: *a* — никеля по вольфраму, *b* — никеля по никелю, *c* — меди по меди, *d* — золота по золоту

ходило, во-первых, потому, что сглаживались неровности на трущихся поверхностях, а во-вторых (когда снижение коэффициента было значительно), влияли те следы газа, которые все еще продолжали удерживаться между отдельными зернами, кристаллитами металлов и которые освобождались в процессе износа металлов при трении.

Наиболее важный итог работы авторов в отношении явлений так называемого сухого трения (т. е. несмазанных поверхностей) на практике тот, что пленки загрязнения, вообще говоря, полезны в технике, поскольку они значительно уменьшают трение по сравнению с чистыми металлами.

*М. Л. Голдовский, Москва*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. F. P. Bowden and T. P. Hughes, Proc. Roy. Soc., 8, 263, 1939.