Доклады Академии Наук СССР
1954. Том XCIX, № 5

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

Г. И. ЕПИФАНОВ, Ф. П. СОЛОШКО и академик П. А. РЕБИНДЕР

НОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ К ИССЛЕДОВАНИЮ АДСОРБЦИОННО-СМАЗОЧНОГО ДЕЙСТВИЯ

Сила внешнего сухого и полусухого трения, возникающая между двумя скользящими друг по другу твердыми поверхностями, как известно, не сохраняется постоянной, а испытывает в процессе скольжения скачкообразное изменение. Особенно ярко скачкообразный характер трения проявляется при относительно небольших скоростях перемещения трущихся поверхностей. Природа этих скачков не может считаться окончательно выясненной. По мнению одних авторов, причина скачков заключена в природе самого трения. Так, Боуден, Лебен и Тейбор полагают (1), что скачки возникают вследствие происходящего сваривания трущихся металлов в точках истинного контакта и последующего разрушения образовавшихся мостиков.

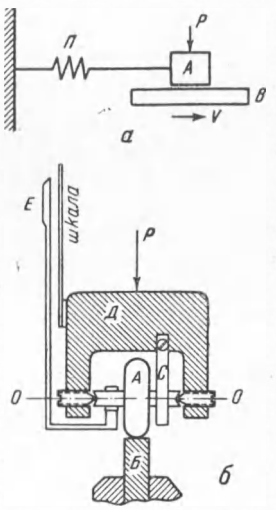


Рис. 1. Схема прибора для определения коэффициента трения скольжения

Другие исследователи (2, 3) считают, что причина скачков лежит не в природе трения, а в особенностях систем (установок), применяемых для изучения явлений трения. В принципе такая система представляет собой (рис. 1 *а*) ползун *A*, перемещающийся по поверхности *B*, к которой он прижимается нагрузкой *P*. Для измерения силы трения ползун *A* или поверхность *B* связаны с упругим элементом *П* (динамометром). Как показали С. Я. Хайкин, Л. П. Лисовский и А. Е. Соломонович (2), в такой системе могут возникать релаксационные автоколебания, вследствие чего движение ползуна *A* относительно поверхности *B* будет происходить не плавно, а рывками. Однако это отнюдь не свидетельствует о том, что сила трения меняется также скачками. Сила трения, действующая на ползун, определяется отклонением его от положения равновесия лишь для случая равномерного движения ползуна. Когда же скорость ползуна резко меняется, сила трения не будет равна упругой силе деформированной пружины динамометра, и, следовательно, отклонение ползуна от положения равновесия не будет мерой силы трения. Условием наступления в системе автоколебаний является (2) падение силы трения с увеличением скорости движения трущихся тел.

И. В. Крагельский и А. Ю. Ишлинский (3) объясняют возникновение скачков при трении возрастанием силы трения с увеличением продолжительности неподвижного контакта. При условии, что измерительная си-

стема обладает упругостью, это может привести к возникновению в ней релаксационных колебаний и, следовательно, к скачкообразному характеру перемещения трущихся поверхностей.

Таким образом, неясно, обусловлены ли скачки трения природой самого явления, т. е. тем, что сила трения по своей сущности не является величиной постоянной, или же эти скачки чужды самому трению и отражают лишь особенности методов, применяемых для его изучения. Важно поэтому было бы провести изучение явления трения методом, предотвращающим возможность возникновения в измерительной системе автоколебаний. Таким требованиям удовлетворяет, как нам представляется, метод, предложенный одним из авторов данной статьи (Г. И. Епифановым). Сущность метода (и прибора) состоит в следующем (см. рис. 1 *б*). Каток *А* в форме шара или цилиндра может свободно вращаться вокруг оси *ОО* (в центрах скобы *Д*). С осью катка связана спиральная пружина *С*, другим концом закрепленная на скобе *Д* и упруго деформирующаяся (закручивающаяся) при повороте катка вокруг оси, и стрелка *Е*. Каток *А* является одним из элементов трущейся пары. Вторым ее элементом служит испытуемый образец *Б*, изготовленный в форме пластины или цилиндра. Элементы пары прижимаются друг к другу силой *Р*. В начальный момент движение катка *А* относительно образца *Б* будет носить характер перекатывания, вследствие чего возникающее трение будет трением качения с коэффициентом $\mu_к$. Качение сопровождается закручиванием пружины *С*, вследствие чего наряду с качением будет возникать частичное проскальзывание катка *А*. Поэтому трение на этой стадии будет смешанным, состоящим из трения качения и трения скольжения. Коэффициент трения μ, постепенно возрастая, получает промежуточные значения между коэффициентами трения качения $\mu_к$ и трения скольжения $\mu_с$. По мере развития процесса, роль трения качения постепенно уменьшается, а трения скольжения возрастает, в пределе в системе установится чистое трение скольжения.

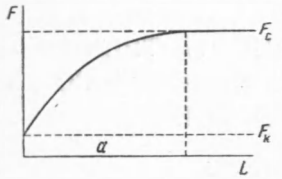


Рис. 2. Кривая изменения силы трения при взаимном перемещении трущихся поверхностей в приборе рис. 1 *б*

Таким образом, отличительной особенностью предлагаемого метода является наличие нестационарной области, в которой происходит непрерывный переход от трения качения через смешанное трение к трению скольжения. Установившемуся (стационарному) состоянию системы соответствует чистое трение скольжения, к которому система приходит путем постепенного, асимптотического приближения.

На рис. 2 приведена схема изменения силы трения при перемещении катка *А* вдоль поверхности образца *Б*. Значение $F_к$ соответствует трению качения, область a — нестационарному (смешанному) трению, и значение $F_с$ — установившемуся трению скольжения.

Асимптотическое приближение системы к устойчивому состоянию, соответствующему трению скольжения, предотвращает возможность возникновения в ней автоколебаний. В такой системе могут возникнуть лишь апериодические колебания, переводящие ее в устойчивое равновесное состояние. По этой же причине сила деформированной пружины *С* для установившегося состояния будет точно соответствовать силе трения скольжения $F_с$, возникшей между трущимися поверхностями.

Наконец, описанный метод приближения системы к установившемуся состоянию полностью исключает возможность влияния продолжительности неподвижного контакта на измеряемую силу трения скольжения.

Нами проведены предварительные опыты по применению предложенного метода для изучения явлений трения. Коэффициенты трения определялись для пары: закаленная быстрорежущая сталь (каток) — отожженное технически чистое железо (образец). Непосредственно перед опытом

поверхность катка тщательно промывалась химически чистым (криоскопическим) бензолом и обрабатывалась активированным углем по методу А. С. Ахматова ([4]). Для получения чистой поверхности образца с него в процессе опыта снималась тонкая стружка. Каток перемещался по свежеобразованной поверхности вслед за резцом. Полученное значение коэффициента трения скольжения оказалось равным 0,70. Такое значение μ_c соответствует весьма чистым поверхностям трения ([5]). Замечательно, что при сухом трении в наших опытах сила трения не испытывала скачкообразного изменения и оставалась практически постоянной. Колебания в значении силы трения не превышали ± 3%.

Нами проведено также изучение влияния на силу трения чистого криоскопического бензола и растворов в нем поверхностно-активных веществ — уксусной, ниловой и стеариновой кислот, метилового, октилового и цетилового спиртов и раствора олеата натрия в воде. При проведении опытов образец железа помещался в специальную кювету, наполненную данной жидкостью. Снятие стружки и определение коэффициента трения производились под слоем смазки.

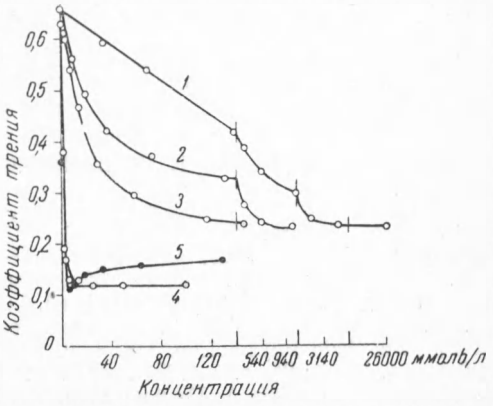


Рис. 3. Изменение коэффициентов трения с увеличением концентрации растворов поверхностно-активных веществ. *1* — метиловый спирт, *2* — октиловый спирт, *3* — цетиловый спирт, *4* — стеариновая кислота, *5* — олеат натрия

Опыты показали, что в чистом бензоле коэффициент трения не остается постоянным, а, достигнув максимального значения, составляющего 0,70, резко падает до 0,30—0,40; затем вновь поднимается до 0,70 и т. д. При введении в бензол поверхностно-активного вещества и постепенном увеличении концентрации раствора величина скачков постепенно уменьшается, а затем скачки исчезают вовсе. На рис. 3 показано изменение коэффициента трения с увеличением концентрации растворов метилового, октилового и цетилового спиртов, стеариновой кислоты и олеата натрия. (Коэффициенты трения вычислялись по максимальному значению силы трения, как того требует рассматриваемый метод.) Как видно из рис. 3, зависимость коэффициента трения от концентрации поверхностно-активного вещества носит ярко выраженный адсорбционный характер с резким падением в области малых концентраций и с достижением предела, соответствующего насыщению адсорбционного слоя. При этом величина наибольшего понижения трения почти одинакова для всех членов одного и того же гомологического ряда (спиртов). Резкое различие обнаруживается только в величинах молярных концентраций, соответствующих достижению наибольшего эффекта. Эти концентрации уменьшаются с возрастанием длины углеводородной цепи в гомологическом ряду в соответствии с правилом Дюкло — Траубе для поверхностной активности, но с коэффициентом значительно меньшим (для спиртов 1,3), чем для поверхности раздела водный раствор/воздух (3,2). Подобная зависимость от концентрации растворов спиртов была получена в работе Н. А. Плетеневой и П. А. Ребиндера ([6]) для удельной работы диспергирования алюминия копьевидным сверлом (коэффициент правила Дюкло — Траубе 1,4).

Для стеариновой кислоты молярная концентрация достижения наибольшего эффекта понижения трения оказалось значительно меньше (примерно в 10 раз), чем соответствующая концентрация цетилового спирта. Такое различие объясняется, видимо, тем, что при снятии стружки

в растворе стеариновой кислоты на поверхности среза в результате химической адсорбции образуется тонкий слой, обладающий высокой смазочной способностью. Это тем более вероятно, что зависимость от концентрации для стеариновой кислоты в бензоле близка к зависимости, полученной для растворов олеата натрия в воде. Однако в последнем случае наблюдается небольшой, но вполне четкий минимум (7), соответствующий, повидимому, мономолекулярному химически фиксированному покрытию поверхности олеиновой кислотой.

Этот минимум, очевидно, аналогичен более резко выраженному минимуму (также соответствующему мономолекулярному слою) и установленному П. А. Ребиндером и Е. К. Венстрем (7) для трения в условиях высоких нормальных давлений.

Институт физической химии
Академии наук СССР

Поступило
28 IX 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] F. Bowden, L. Leben, Proc. Roy. Soc., A, **169**, 214 (1939); F. Bowden, D. Tabor, Nature, **150**, 197 (1942); F. Bowden, L. Leben, D. Tabor, Engineering, London, **168**, 214 (1939). [2] С. Я. Хайкин, Л. П. Лисовский, А. Е. Соломонович, Трение и износ в машинах, **1**, 1939, стр. 468—483; ДАН, **24**, № 2 (1939); Н. Л. Кайдановский, С. Я. Хайкин, ЖТФ, **3**, в. 1 (1933). [3] А. Ю. Ишлинский, И. В. Крагельский, ЖТФ, **14**, в. 4—5 (1944). [4] А. С. Ахматов, Acta Physicohim. URSS, 9, 51 (1938). [5] В. В. Карасев, Г. И. Измайлова, ЖТФ, **24**, в. 5 (1954). [6] Н. А. Плетенева, П. А. Ребиндер, ДАН, **62**, № 4 (1948). [7] П. А. Ребиндер, Е. К. Венстрем, Изв. ОМЕН АН СССР, сер. физ., № 4—5, 531 (1937).