

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

С. Б. РАТНЕР

О ЗАКОНЕ СТАТИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ

(Представлено академиком П. А. Ребиндером 2 II 1952)

Силу статического трения F обычно рассчитывают по формуле

$$F = \mu N, \quad (1)$$

где N — сила, прижимающая одно тело к другому, μ — коэффициент трения покоя, который считается не зависящим от N .

Однако опыт показывает, что коэффициент трения μ , рассчитанный по формуле (1), в действительности не постоянен: μ уменьшается с увеличением N для разных пар (1).

Поскольку такое явление может быть существенным для трущихся пар, включающих резину, мы провели исследование статического трения резины по металлам, плексигласу и другим материалам.

Номинальная площадь контакта образцов резины (0,37 см²) не увеличивается ни с увеличением нагрузки, ни с увеличением времени неподвижного контакта.

Приведенные на рис. 1 и 2 данные показывают, что при трении резины по металлу, так же как и для других пар, наблюдается уменьшение μ при увеличении N . Аналогичные результаты получены и для трения резины по плексигласу.

Рассмотрим связь между μ и N на основании наших опытных данных и, найдя функцию $\mu(N)$, проверим ее путем анализа физического смысла входящих в нее констант.

Представим μ в виде ряда:

$$\mu = a + bx + cx^2 + \dots, \quad (2)$$

где x — параметр, однозначно связанный с N .

Учитывая работы Б. В. Дерягина (2, 3), положим $x = 1/N$; при этом чем больше N , тем точнее данные опыта.

Наши опытные данные в координатах $\mu(1/N)$ дают прямую линию (см. рис. 1).

Приблизительно такой же результат может быть получен и из литературных данных для статического трения меди по меди (4), алюминия по алюминию (4) (и даже для кинетического трения стали по стали (5) при смазке октиловым спиртом), а также для скольжения слюды (3), хотя в последнем случае может показаться, что $\mu = \text{const}$, если применить систему координат $F(N)$ вместо $\mu(1/N)$.

Следовательно, в формуле (2) можно ограничиться первыми двумя членами:

$$\mu = a + b/N. \quad (3)$$

Таким образом, очевидно, что первая константа $a = \mu_{\infty}$ есть минимальное значение коэффициента трения, имеющее место при $N \rightarrow \infty$ (или когда $N \gg b$).

Для выяснения физического смысла второй константы, имеющей размерность силы, $b = F_0$, подставим (3) в (1); тогда

$$F = F_0 + \mu_{\infty} N. \quad (4)$$

Из (4) ясно, что F_0 — минимальная сила трения, имеющая место, когда внешней нагрузки нет. Следовательно, F_0 — касательная сила, необходимая для сдвига одного тела по другому при $N = 0$.

Если N_0 — нормальная сила сцепления между телами в отсутствие внешней нагрузки, то можно, по аналогии с (1), написать:

$$F_0 = \mu_0 N_0, \quad (5)$$

где μ_0 — коэффициент «трения» нормальных сил сцепления, не зависящих от внешней нагрузки.

Не вдаваясь здесь в дискуссию о природе сил трения, мы считаем $\mu_{\infty} N$ (или μ_{∞}) суммой двух членов, связанных, с одной стороны, с молекулярными силами, с другой стороны, — с могущими играть роль геометрическими (механическими) особенностями трущихся поверхностей и др.

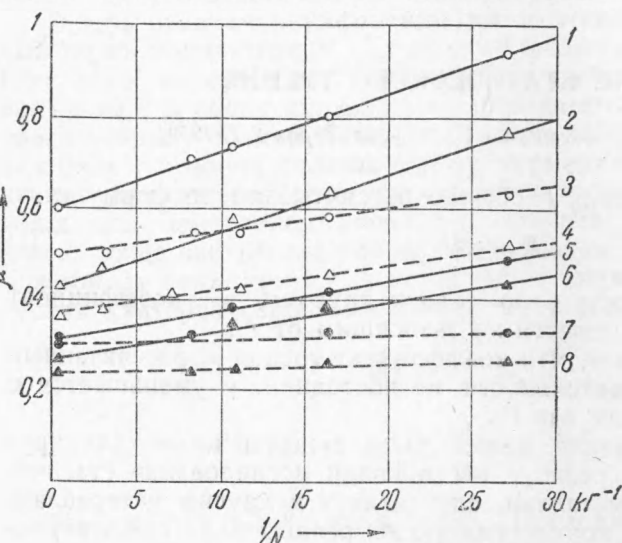


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения резины по металлу от обратной нагрузки. 1, 2, 5, 6 — резина № 1, твердостью 60 по Шору (модуль сжатия 70 кг/см^2); 3, 4, 7, 8 — резина № 2, твердостью 90 по Шору (модуль сжатия 200 кг/см^2); 2, 4, 6, 8 — по стали С-25; 1, 3, 5, 7 — по алюминийсодержащему сплаву АМГ-7; 1, 2, 3, 4 — температура 20° ; 5, 6, 7, 8 — температура 80°

Аналогично обстоит дело, очевидно, и для F_0 .

Из (4) и (5) получим общий закон трения покоя:

$$F = \mu_0 N_0 + \mu_{\infty} N, \quad (6)$$

а для коэффициента трения, учитывая (1), — формулу:

$$\mu = \mu_{\infty} + \mu_0 N_0 / N = \mu_{\infty} + F_0 / N. \quad (7)$$

Эта формула показывает, что определение F_0 следует проводить из опытных данных как тангенс угла наклона прямой в системе координат $\mu(1/N)$.

Для того чтобы оценить справедливость полученных формул при малых значениях N , на рис. 2 приведены в координатах $F(N)$ некоторые опытные данные для трения пары резина — металл. Аналогичные данные имеются ⁽²⁾ для пары парафин — стекло. Сумма рассмотренных данных говорит о справедливости линейной формулы ⁽⁴⁾ во всем интервале изменения N . Но опытные результаты не дают оснований написать

$$F = \mu_1 (N_0 + N), \quad (8)$$

как это делает Г. Д. Полосаткин (см. ⁽¹⁾, стр. 162).

Формула (8) означает, что $\mu_0 = \mu_\infty$ (см. формулу (6)). Однако эти коэффициенты различны по своей природе: первый связан с постоянной компонентой сил сцепления, второй — с суммой молекулярных и механических сил, зависящих (прямо пропорционально) от N .

Поэтому μ_0 и μ_∞ могут по-разному меняться при изменении условий опыта, при замене одного из членов трущейся пары и т. д. Так, из наших опытных данных следует, что при трении каждой данной резины по различным металлам (при каждой заданной температуре) сохраняется постоянным F_0 , тогда как μ_∞ меняется.

Для согласования этого факта с формулой (8) можно было бы предположить, что во всех случаях, когда увеличивается μ_1 , то ровно во столько же раз уменьшается сила сцепления N_0 , так, чтобы в согласии с опытом, произведение $\mu_1 N_0$ было постоянно. Но такое предположение неестественно, тем более, что отмеченный результат воспроизводится для разных резин и при различных температурах. Следовательно, вызывает серьезные сомнения правомерность формулы (8).

При написании этой формулы Полосаткин молчаливо допускает равенство $\mu_0 = \mu_\infty$, игнорируя теорию Б. В. Дерягина (2), пришедшего к формуле (8) еще в 1934 г. на основании определенных представлений о роли и характере действующих молекулярных сил. Формула (8), проверенная на опыте с трением парафина по стеклу (2), оказалась неприемлемой для трения резины по металлам, так как обнаружено изменение μ_∞ при постоянстве F_0 . Это постоянство может и не наблюдаться для различных пар, для которых все же справедлива будет формула (6), могущая иногда превращаться в ее частный случай — формулу (8).

Совпадение опытных данных с формулами (6) или (8), являющимися частными случаями формулы (4), говорит о плодотворности физических идей Кулона (см. (6)) и Дерягина (2) о влиянии молекулярного взаимодействия между трущимися поверхностями на силу трения. Примером того, что пренебрежение этими идеями приводит к ошибкам, является формула Тириона, исследовавшего (7) трение резины. Он предлагает формулу для коэффициента скольжения:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_0} + AN. \quad (9)$$

Эта формула не может дать прямой линии в предложенной нами и апробированной опытом системе координат $\mu(x)$, так как из (9) следует:

$$\mu = \frac{x}{A + x/\mu_0}. \quad (10)$$

Поэтому неудивительно, что с формулой Тириона расходятся его же опытные данные, согласующиеся с установленными в нашей ра-

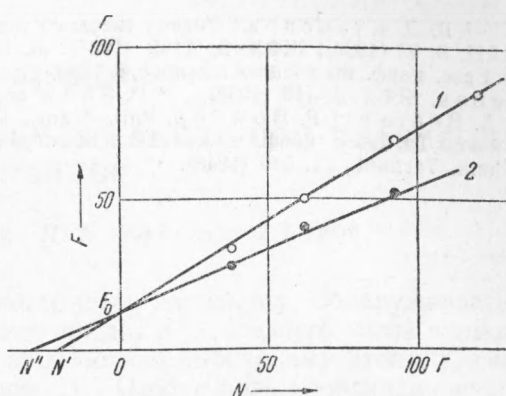


Рис. 2. Зависимость силы трения от нагрузки. 1 — резина № 1 по сплаву АМГ-, $1 - N'_0 = F_0 / \mu'_\infty = 20 \text{ Г}$; 2 — резина № 1 по стали С-25, $- N''_0 = F_0 / \mu''_\infty = 30 \text{ Г}$

боте формулами $F = \mu_{\infty} N + \mu_0 N_0$ для силы трения и $\mu = \mu_{\infty} + \mu_0 N_0 / N$ для коэффициента трения.

Автор с благодарностью отмечает участие Г. П. Коненковой в экспериментальной части работы и Б. В. Дерягина в обсуждении результатов.

Научно-исследовательский институт
резиновой промышленности

Поступило
17 XII 1951

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. Д. Кузнецов, Физика твердого тела, 4, Томск, 1947. ² Б. В. Дерягин, ДАН, 3, 93 (1934); ЖФХ, 5, 1165 (1934); Б. В. Дерягин и В. П. Лазарев, Тр. II Всес. конф. по трению и износу, 3, 1949, стр. 106. ³ Б. В. Дерягин и В. П. Лазарев, ЖФХ, 5, 416 (1934). ⁴ P. Shaw and E. Leavy, Phil. Mag., 10, 809 (1938). ⁵ A. Beare and P. Bowden, Phil. Trans., A, 234, 322 (1934). ⁶ И. В. Крагельский, Тр. Всес. конф. по трению и износу, 1, 1939, стр. 543. ⁷ P. Thirion, Rub. Chem. Technol., 21, 505 (1948).