Доклады Академии Наук СССР
1953. Том XCIII, № 1

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

С. Б. РАТНЕР

О РОЛИ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ ТРЕНИИ РЕЗИНЫ И О ЗАКОНЕ ТРЕНИЯ

(Представлено академиком П. А. Ребиндером 22 VIII 1953)

В соответствии с теорией Б. В. Дерягина ([1]), сила трения зависит от нормальной нагрузки N по формуле

$$F_1 = \mu_1 (N + N_0), \tag{1}$$

где μ_1 — постоянный (истинный) коэффициент трения, соответствующий среднему значению угла микроподъема, который «зависит от молекулярно-атомной шероховатости поверхности» (стр. 167); N_0 — «равнодействующая сил молекулярного притяжения между обоими телами» (стр. 177), пропорциональная площади действительного контакта трущихся тел.

Величину N_0 надо добавить к внешней нагрузке N, чтобы учесть всю нормальную силу, действующую на поверхностях истинного контакта, где существенна микрошероховатость трущихся тел.

Молекулярная теория Дерягина правильно описывает роль тех сил, которые возникают на поверхностях истинного контакта. Но она не учитывает роли непосредственного механического зацепления, связанного с грубой (обычной) шероховатостью. Однако такая макрошероховатость должна приводить к дополнительной составляющей силы трения

$$F_2 = \mu_2 N, \tag{2}$$

где μ_2 — коэффициент трения, соответствующий среднему углу макроподъема, связанному с грубой шероховатостью ([2]). При этом изменение площади истинного контакта, возникающее при изменении макрошероховатости, будет сказываться на изменении величины N_0 (могущей зависеть и от N).

Таким образом, полная сила трения

$$F = (\mu_1 + \mu_2) N + \mu_1 N_0, \tag{3}$$

$$F = \mu_\infty N + F_0, \tag{4}$$

где*

$$\mu_\infty = \mu_1 + \mu_2, \tag{5}$$

$$F_0 = \mu_1 N_0. \tag{6}$$

* Если учитывать влияния макрошероховатости не только на площадь контакта (т. е. на N_0, см. выше), но и на микрошероховатость (т. е. на μ_1) — за счет заклинивающего действия и необходимости взаимоогибания соприкасающихся макровыступов, то вместо μ_2 в наши формулы можно поставить $\mu_3 = \mu_2\mu_1$. Тогда $F = \mu_1 [(1 + \mu_2) N + N_0]$, ибо $\mu_\infty = \mu_2 (1 + \mu_2)$. Этот результат, полученный нами совместно с Б. В. Дерягиным при обсуждении данной статьи, не изменит последующих выводов, носящих качественный характер.

Посмотрим, насколько это согласуется с данными опыта, причем во всех случаях ([3-7]) является бесспорным наличие двух членов в законе трения (4) и стоит лишь вопрос об их связи между собой. При этом может быть использована также формула

$$\mu = \mu_\infty + \frac{F_0}{N}, \tag{7}$$

являющаяся результатом подстановки (4) в формулу, служащую для определения расчетного коэффициента трения

$$\mu = \frac{F}{N}. \tag{8}$$

Для того чтобы непосредственно количественно доказать справедливость формулы (3), предложенной нами ранее ([3]) в форме

$$F = \mu_\infty N + \mu_1 N_0, \tag{9}$$

следует измерить μ_∞ и μ_1 и показать, что $\mu_\infty > \mu_1$. Определение μ_∞ не представляет трудностей, ибо он может быть найден как характеристика прямой линии при обработке экспериментальных данных либо в координатах $F - N$, согласно формуле (4), либо в координатах $\mu - 1/N$, согласно формуле (7).

При этом в качестве второй характеристики прямой линии может быть найдена и величина F_0. Однако, зная F_0 можно по формуле (7) найти μ_1, лишь если непосредственно измерена сила прилипания N_0 в тех же точно условиях, в которых определено F_0. Это измерение, которое может быть проведено при использовании метода скрещивающихся нитей, представляет специфические трудности ([4]). Поэтому обратимся к качественной проверке справедливости формул (3) и (9).

Согласно изложенным представлениям, увеличение шероховатости металла должно двояко влиять на коэффициент трения. С одной стороны, должно увеличиваться μ_2, с другой — за счет уменьшения контакта — должно уменьшаться N_0.

Этот эффект существенен, главным образом, для мягких резин, особенно при малой нагрузке ([7]); см. формулу (7). Поэтому при увеличении шероховатости стали мы наблюдаем (см. табл. 1) при удельной нагрузке $P = 0{,}1$ кГ/см^2 уменьшение μ за счет уменьшения N_0, а при $P = 10$ кГ/см^2 — увеличение μ за счет увеличения механического зацепления (т. е. μ_2), что особенно проявляется при увеличении твердости резины. При этом, при определенных сочетаниях твердости резины и шероховатости стали, наблюдается тенденция роста коэффициента трения с увеличением нагрузки (см. табл. 1). Аналогичная картина имеет место и при увеличении шероховатости латуни и алюминия.

Далее, если бы формула (1) была применима в качестве закона трения, т. е. выражала бы всю силу трения (а не часть ее), то $\mu_2 \cong 0$, $\mu_\infty \cong \mu_1$, а следовательно, должна быть строгая пропорциональность между F_0 и μ_∞ согласно формулам (5) (6). Этого можно ожидать в случае, когда макрошероховатость очень мала — трение со смазкой (стеариновая или олеиновая кислоты) парафина по стеклу ([5]), трение гладких скрещивающихся нитей из плавленого кварца, как обнаженных, так и покрытых тонкой пленкой каучука ([4]).

Такого явления не должно наблюдаться при «сухом» трении резины, когда нельзя пренебречь μ_2 по сравнению с μ_1. При трении одинаковых образцов резины, содержащих лишь различные количества разных наполнителей, частицы которых обволакиваются пленкой каучука, величина μ_∞ оставалась практически постоянной ([7]), ибо $\mu_2 = \mathrm{const}$, так как одинакова макрошероховатость, а микрорельеф

Таблица 1

Коэффициент статического трения резины на основе СКН-26 по металлам с различной степенью механической обработки поверхности

Содержание сажи в вес. ч.	Твердость резины по Шору	Уд. нагрузка в кГ/см²	Сталь ▽▽▽	Сталь ▽▽	Сталь ▽	Латунь ▽▽▽	Латунь ▽▽	Алюминий ▽▽▽	Алюминий ▽▽
10	52	0,1	0,96	0,81	0,80	1,32	1,18	0,99	0,99
		1,0	0,83	0,78	0,68	0,92	0,84	0,78	0,84
		10,0	0,43	0,48	0,54	0,56	0,49	0,49	0,52
45	71	0,1	0,74	0,61	0,64	0,97	0,95	0,60	0,82
		1,0	0,64	0,61	0,60	0,74	0,68	0,57	0,68
		10,0	0,43	0,59	0,67	0,41	0,43	0,57	0,67
120	96	0,1	0,44	0,61	0,42	0,33	0,72	0,57	1,06
		1,0	0,25	0,37	0,33	0,27	0,38	0,32	0,58
		10,0	0,27	0,40	0,52	0,26	0,51	0,33	0,74

меняется незначительно, в пределах совместимости каучука с наполнителем (сажа, графит, мел, двуокись кремния).

Изменение μ_∞ может быть достигнуто за счет изменения поверхности металла (переход к другому виду или образцу) или при введении настолько большого количества наполнителя, что он уже выходит за пределы совместимости с каучуком и служит прослойкой между трущейся парой. Оба эти способа, которые должны привести к изменению μ_∞, в действительности наблюдались ([7]).

При изменении μ_∞ за счет изменения μ_2, т. е. перемены поверхности металла (см. также табл. 1), или даже при переходе к плексигласу наблюдалось практическое постоянство F_0 для резины с данным количеством наполнителя, что говорит о доминирующей роли резины (как наиболее мягкого компонента трущейся пары) в создании микрорельефа поверхности трения.

Изменение μ_∞ может быть произведено и за счет изменения μ_1, т. е. молекулярного рельефа, что может быть осуществлено при переходе от одного каучука к другому или от одного металла к другому ([3],[7]).

Таблица 2

Влияние температуры на константы формулы (4) при статическом трении резины на основе СКБМ (твердость по Шору 90) по стали (а) и алюминийсодержащему сплаву (б)

Т-ра в °	μ_∞ а	μ_∞ б	F_0 в кГ/см² а	F_0 в кГ/см² б
20	0,36	0,5	16	17
50	0,30	—	10	—
80	0,24	0,3	3	3

Остановимся, наконец, на роли температуры. Согласно вышесказанному, изменение температуры резины не должно влиять на макрошероховатость μ_∞, но существенно для микрорельефа μ_1, а возможно, и N_0 при трении резины, физико-механические свойства которой сильно зависят от температуры. Поскольку тепловое движение ослабляет действие межмолекулярных сил, определяющих величину F_0, мы должны ожидать, что при повышении температуры будет значительно уменьшаться F_0 без столь существенного понижения μ_∞. Опыт ([3]) подтверждает это (см. табл. 2).

Приняв вытекающую из релаксационных представлений о резине ([8]) зависимость

$$F_0 = Ae^{U/RT}, \tag{10}$$

получаем из табл. 2, что $U \cong 5$ ккал/моль; это соответствует обычным значениям энергетического барьера ван-дер-ваальсовых сил.

Такая зависимость имеет место лишь до тех пор, пока дальнейшее повышение температуры не приводит к значительному размягчению резины, в результате чего сильно увеличивается площадь истинного контакта и расчетный коэффициент трения μ повышается. Так, при трении резины по стали при $P=1$ кГ/см², $\mu=0{,}25$ при 80° (табл. 2), 0,23 при 95° и 0,5 при 110°, т. е. кривая проходит через минимум.

Автор с благодарностью отмечает участие Б. В. Дерягина в обсуждении результатов, Р. К. Гольневой и Г. П. Коненковой — в проведении опытов.

Поступило
16 VIII 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] Б. В. Дерягин, Что такое трение, изд. АН СССР, 1952; ДАН, 3, 93 (1934); ЖФХ, 5, 1165 (1934). [2] В. Д. Кузнецов, Физика твердого тела, 4, Томск, 1947, стр. 19. [3] С. Б. Ратнер, ДАН, 83, 443 (1952). [4] Б. В. Дерягин, С. Б. Ратнер, М. Ф. Футран, ДАН, 92, № 6 (1953). [5] Б. В. Дерягин, В. П. Лазарев, Тр. Всесоюзн. конфер. по трению и износу, 3, 106 (1949), [6] И. В. Крагельский, Б. В. Дерягин, там же, 1, стр. 159. [7] С. Б. Ратнер, В. Д. Сокольская, ДАН, 86, 121 (1952). [8] П. П. Кобеко, Аморфные вещества, изд. АН СССР, 1952; Б. А. Догадкин, Химия и физика каучука, 1947.