

УДК 531.44

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

И. В. КРАГЕЛЬСКИЙ, Н. М. МИХИН, К. С. ЛЯПИН

**ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ МОЛЕКУЛЯРНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СИЛЫ
ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ ПОКОЯ НА ОДНОШАРИКОВОМ ТРИБОМЕТРЕ**

(Представлено академиком П. А. Ребиндером 21 VI 1972)

Внешнее трение имеет двойственную природу. Во-первых, оно связано с преодолением различных связей, возникающих между поверхностями твердых тел (ван-дер-ваальсовы силы, химические связи и др.). Они возникают в местах истинного контакта, где теряется граница раздела между телами. В этом тонком (десятки ангстрем), слое, третьем теле, который может находиться в жидкой или твердой фазе, при сдвиге по существу преодолевается внутреннее трение, которое мы условно называем молекулярной (адгезионной) составляющей внешнего трения, так как оно обусловлено молекулярной природой контакта. Во-вторых, вследствие шероховатости и волнистости поверхностей имеет место взаимное внедрение неровностей и формоизменение слоя, лежащего под поверхностью молекулярного взаимодействия. Работа, необратимо затраченная на формоизменение этого слоя, называется механической составляющей внешнего трения, так как оно обусловлено механическими свойствами деформируемого тела. Толщина слоя зависит от нагрузки, шероховатости, механических свойств и составляет доли микрона.

Таким образом, трение обусловлено потерей энергии на процессы, развивающиеся на двух уровнях: непосредственно на поверхности и на некоторой глубине под пленкой, покрывающей поверхность. В первом приближении можно считать, что эти процессы протекают независимо друг от друга.

В этом случае работа, затрачиваемая на преодоление трения, представляется в виде суммы двух работ, а коэффициент трения — в виде суммы двух коэффициентов: молекулярного f_1 и механического f_2 (¹, ²).

Механическая составляющая трения, вычисленная Гранвуане и В. Г. Горячкиным, изучена достаточно хорошо (¹, ²). Ее значение

$$f_2 = \alpha k \sqrt{h/R},$$

где α — коэффициент гистерезисных потерь (по Боудену и Табору), k — коэффициент, определяемый геометрической конфигурацией контакта; h — внедрение единичной неровности, R — ее радиус.

Что касается молекулярной составляющей трения, то применительно к условиям наличия жидкой пленки она была детально изучена Б. В. Дерягиным (¹), получившим следующую двучленную зависимость:

$$f_1 = \tau_0 / P_r + \beta.$$

Эта зависимость была распространена и на сухое трение (²).

Однако вопрос об изучении молекулярного трения твердых тел, освобожденных от жидких пленок, оставался открытым в связи с трудностями разделения молекулярной и механической составляющих в условиях сухого трения. Для раздельного их определения нами был сконструирован специальный одношариковый трибометр (³).

Подобный трибометр для оценки жидких смазок ранее был использован Кларком, Вудсом и Уайтом (4), которые, пользуясь им, определяли сопротивление смазки сдвигу. Для сведения до минимума механической составляющей сил трения шарик, зажатый между двумя пластинами, сжимался нормальной нагрузкой и образовывал отпечатки на этих пластинах. Далее, шарик в этих лунках проворачивался под нагрузкой.

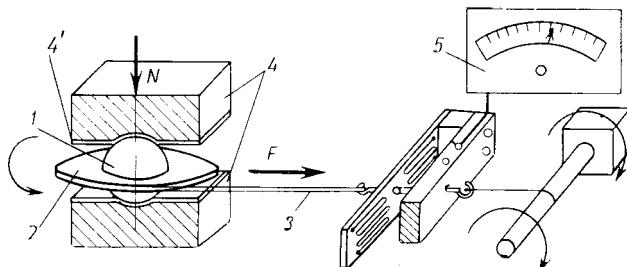


Рис. 1. Схема одношарикового трибометра: 1 — шаровой индентор, 2 — оправка, 3 — тросик, 4 — плоские пластины, 4' — Ag, Ni ($h \approx 5-7 \mu$), 5 — самописец

В этом случае формоизменение поверхности сводилось к минимуму и возникающее сопротивление практически можно отнести к пленочному молекулярному трению.

Для получения в «чистом виде» механической составляющей шарик следует прокатывать на поверхности деформируемого металла, ибо в этом случае работа, затрачиваемая на «отрыв» молекулярной связи, ничтожно мала по сравнению с работой формоизменения поверхности.

Схема прибора, на котором проводились исследования молекулярной составляющей, приводится на рис. 1. Шарик 1 запрессованный в оправку 2, имеющую кольцевой наружный паз для тросика 3, сжимается между двумя параллельными пластинами 4 и проворачивается вокруг своей оси. Возможны два варианта испытаний — при вращении шарика около оси, совпадающей с вектором нагрузки, и около оси, перпендикулярной к вектору нагрузки. В первом случае будет иметь место трение вальцовки, во втором — скольжения. Момент, необходимый для вращения шарика вокруг своей оси, регистрируется самописцем 5.

Для выявления влияния нормальных напряжений на молекулярное трение необходимо иметь возможность изменять средние нормальные напряжения на контакте, не меняя свойств контактирующих тел. Этому требованию удовлетворяют условия опыта, когда один и тот же шар вдавливается в образцы различных материалов, значительно отличающихся по твердости. Эти образцы покрываются пленкой из одного и того же материала, нанесенной гальваническим путем, или фольгой. Толщина покрытия выбиралась такой, чтобы исключить влияние на средние нормальные напряжения физико-механических свойств самого покрытия.

Под нормальной нагрузкой шарик проворачивался на 360° ; при этом не было замечено увеличения диаметра лунки, а момент трения оставался практически неизменным.

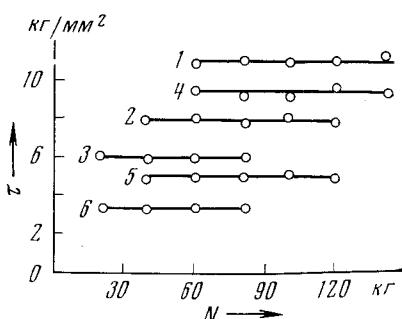


Рис. 2. Влияние нормальной нагрузки на сдвиговое напряжение: никель (8 μ) (1—3) и серебро (10 μ) (4—6) на стали (1, 4), меди (2, 5), алюминии (3, 6)

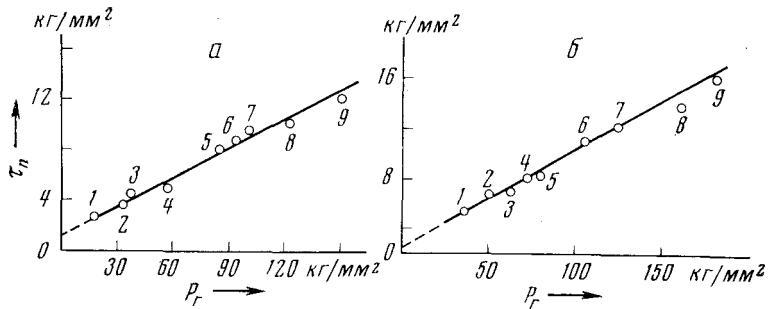


Рис. 3. Зависимость сдвиговых напряжений от нормальных напряжений на контакте. *а* — серебро гальваническое ($h = 10 \mu$), нанесенное на кадмий (1), алюминий (2), медь (3, 4, 6), армко-железо (5), кобальт (7), сталь (8), никель (9); *б* — никель гальванический ($h = 8 \mu$), нанесенный на медь (1, 3, 4), алюминий (2), армко-железо (5), сталь (6), кобальт (7), никель (8), молибден (9)

На рис. 2 приведены результаты исследований для пар трения сталь ШХ-15 — никель, серебро, покрытия из никеля и серебра были нанесены на некоторые материалы при разных нагрузках, но постоянном давлении на контакте, определяемом твердостью материала. Как видим, сдвиговые напряжения для каждой пары, независимо от нагрузки, остаются неизменными.

На рис. 3а приводятся результаты опытов с парой трения серебро — сталь ШХ-15. Слой серебра в виде гальванического покрытия наносился на различные металлы. На рис. 3б приводятся результаты для пары никель (гальваническое покрытие) — сталь ШХ-15.

В обоих случаях имеет место двучленная зависимость

$$\tau_n = \tau_0 + \beta P_r,$$

полученная также и для других пар металлов при скольжении без смазки, при скольжении со смазкой, а также и для трения полимеров.

Этот результат показывает неправильность представлений о том, что трение обусловлено прочностью на срез более мягкого материала пары трения, ибо в том случае значение τ_n должно быть постоянной, составляющей примерно $1/6$ от твердости, или же это должны были быть постоянные, характеризующие прочность соответствующих окислов на срезе. Так как $\tau_n = 1/2 \sigma_s$, а $\sigma_s = 1/3 H_B$, где σ_s — предел текучести, а H_B — твердость материала, то для случая серебра τ_n должно быть равно $9 \text{ кг}/\text{мм}^2$, а для никеля $30 \text{ кг}/\text{мм}^2$.

Полученная нами зависимость сдвигового сопротивления от сжимающего напряжения (для серебра от 2 до $12 \text{ кг}/\text{мм}^2$, для никеля от 5 до $16 \text{ кг}/\text{мм}^2$) является косвенным подтверждением того, что третье тело следует рассматривать как квазижидкую фазу, вязкость которой существенно возрастает при действии сжимающих напряжений. Коэффициент β можно назвать пьезокоэффициентом молекулярного трения.

Практически важно, что коэффициент молекулярного трения существенно зависит от давления как для сухих тел, так и для смазанных. Следовательно, нельзя оценивать трение тел, не фиксируя давление. Эта четкая зависимость для плоских поверхностей имеет место применительно к фактическому давлению на истинной площади контакта; однако применительно к номинальному давлению эта зависимость теряет свою четкость, так как при значительном изменении номинального давления фактическое давление изменяется незначительно.

При наличии двух характеристик τ_0 и β можно рассчитать коэффициент молекулярного трения для различных давлений, действующих на

Таблица 1

Материал *	H_B кг/мм ²	E , кг/мм ²	τ_0 кг/мм ²	β
Индий	0,8	1100	0,450	0,050
Свинец	3,3	1800	0,350	0,060
Олово	4,6	4150	0,500	0,065
Серебро	25	8200	1,00	0,075
Медь	40	11700	1,50	0,075
Хром	100	22000	1,950	0,120
Никель	70	22000	2,550	0,085
Титан	190	11750	2,850	0,080
Молибден	190	33630	3,10	0,090
Политетрафторэтилен	3,1	179	0,030	0,017
Полиэтилен низкого давления	4,6	—	0,090	0,040
Полиметилметакрилат	16	370	1,00	0,110
Капрон	13	176	0,07	0,050
Графит	21	—	0,08	0,050
MoS ₂	3,8	—	0,03	0,050
TaSe ₂	—	—	0,35	0,140
Алюминиевый подшипниковый сплав A-20	—	—	1,60	0,050
Подшипниковый сплав ACC-6-5	—	—	1,00	0,065

* Другой компонентой пары трения был стальной шарик диаметром 12,7 мм.

контакте. В табл. 1 приводятся значения характеристик τ_0 и β для различных пар трения (металлов и полимеров с металлами). При сверхвысоких давлениях также имеет место двучленная зависимость (⁵⁻⁷). Однако коэффициенты, входящие в это уравнение, отличаются от полученных нами, в связи с иными характеристиками процессов, протекающих при сдвиге. В рассматриваемом нами случае преодолевается сопротивление в контакте двух тел, разделенных окисными и адсорбированными пленками; в случае экспериментов при сверхвысоких давлениях сдвиг происходит непосредственно в самом материале.

Государственный научно-исследовательский
институт машиноведения
Москва

Поступило
26 V 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Б. В. Дерягин, ЖФХ, № 5, 1165 (1934). ² И. В. Крагельский, Б. В. Дерягин, Трение и износ в машинах. Сборн. Тр. II Всесоюз. конфер. по трению и износу в машинах, 1, 1947, стр. 159. ³ Авт. свид. № 268722; Бюлл. изобр., № 14 (1970). ⁴ O. H. Clark, W. W. Woods, J. R. White, J. Appl. Phys., **22**, № 4 (1951). ⁵ Л. Ф. Верещагин, Е. В. Зубова, К. П. Бурдина, ДАН, **196**, № 5 (1971). ⁶ П. В. Бриджмен, Новейшие работы в области высоких давлений, ИЛ, 1948. ⁷ И. В. Крагельский, Вестн. машиностроения, № 2-3, 14 (1946).