

О ПРИРОДЕ «СТАТИЧЕСКОГО» ТРЕНИЯ КАУЧУКОПОДОБНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Г. М. Бартенев, В. В. Лаврентьев

В противоположность кинетическому, «статическое» трение резины изучено недостаточно. Это объясняется тем, что исследование так называемого статического трения встречает экспериментальные трудности в связи с особыми фрикционными свойствами каучукоподобных полимеров [1—4].

В связи с этим ряд авторов [5—7] отказался от прямого измерения статического трения резины, заменив его измерением трения при постоянной малой скорости скольжения, полагая, что эта величина близка к статическому трению. Но в работах [8, 9] обнаружена тенденция к исчезновению трения резины по стали с уменьшением скорости скольжения до нуля, тогда как в работе одного из нас [10], исходя из результатов измерений трения на маятниковом трибометре, сделан вывод о существовании у резины статического трения той же природы, что и у твердых тел.

Опыты, поставленные нами на маятниковом трибометре, привели к заключению о том, что точность этого метода недостаточна для надежного определения статического трения высокоэластичных материалов. На рис. 1 изображена диаграмма, записанная на трибометре для пары резина—сталь (кривая 1). Момент отхода кривой от оси ординат согласно [10] соответствует статическому трению. Точность, с которой регистрировался отход кривой от оси ординат, равна толщине вычерченной первом на барабане кривой 0,2—0,3 мм [10].

Этот допуск в 0,2—0,3 мм соответствует смещению образца к моменту видимого отхода кривой от вертикальной оси. В аналогичной методике Ротом, Дрисколлом и Холтом этот допуск был принят равным 0,5 мм [5].

Кривая 2 получена нами в опытах с вязкой жидкостью, заключенной в стальном стакане, в котором может свободно перемещаться поршень. Как видно, диаграмма течения высоковязкой жидкости качественно не отличается от диаграммы трения резины, вследствие чего подобная методика определения статического трения не может быть принята.

В работах [5, 10] определялось трение, возникающее в момент, когда образец резины переместится на некоторую малую величину (допуск), обусловленную точностью отсчета. В дальнейшем определенную таким образом силу трения будем называть «начальной силой трения».

Если установленное кинетическое трение зависит от скорости скольжения, нагрузки и температуры, то начальное трение резины является более сложной величиной, так как зависит и от времени предварительного контакта. Эта зависимость выявляется отчетливо, если последнее изменять в пределах нескольких минут; при больших значениях времени предварительного контакта начальное трение остается практически постоянным. Чтобы исключить влияние этого фактора, время предварительного контакта было взято во всех опытах равным 3 мин.

Измерения производили на трибометре Института резиновой промышленности [11], в котором можно задавать различные постоянные скорости смещения и устанавливать сменные динамометры различной жест-

кости. Динамометры включаются между образцом резины и тянувшим устройством. Так как в опытах задается скорость перемещения на выходе тянувшего устройства, то необходимо некоторое время, чтобы динамометр включился в работу: чем жестче динамометр, тем это время меньше и тем быстрее происходит приложение тянувшего усилия к образцу.

На рис. 2 приведены результаты измерения начальной силы трения с допуском 0,15 мм, полученные на динамометрах различной жесткости при скорости тяги 0,08 мм/сек. Под жесткостью динамометра понимается величина силы, необходимая для деформации силового устройства динамометра на 1 мм. Жесткость маятникового динамометра, на котором в работе [10] были произведены измерения для доказательства наличия у резины статического трения, зависит от величины груза и от угла отклонения маятника; область жесткости этого динамометра ограничена на рисунке стрелками.

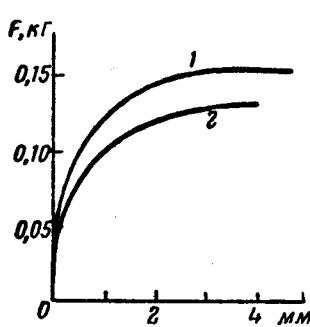


Рис. 1

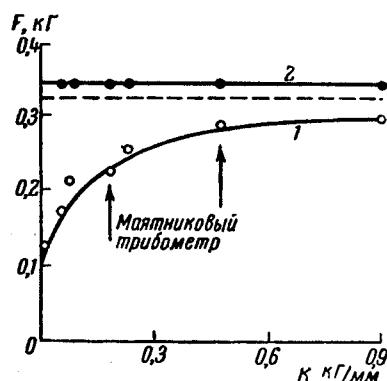


Рис. 2

Рис. 1. Диаграммы записи на маятниковом трибометре сил внешнего и внутреннего трения в зависимости от величины смещения тянувшего устройства при нарастающей тянущей силе (скорость тяги 50 мм/мин):

1 — внешнее трение резины СКН-18 по стали при малой нагрузке; 2 — внутреннее трение высоковязкой жидкости (раствор каучука)

Рис. 2. Зависимость между тангенциальной силой (показанием динамометра) и жесткостью динамометра K при трении резины СКН-26 по стали. Скорость тянувшего устройства 0,08 мм/сек:

1 — начальное; 2 — установившееся трение

С увеличением жесткости динамометра начальная сила трения стремится к значению, полученному на динамометре большой жесткости. Эти опыты свидетельствуют о том, что измеряемая начальная сила трения зависит от скорости приложения тангенциальной силы и что данные различных авторов могут быть сравнимы только при условии применения достаточно жестких динамометров, которыми практически являются динамометры тензометрической системы. Жесткость подобного динамометра в наших измерениях была порядка 10^3 кГ/мм. Штриховой линией на рис. 2 показано трение, измеренное с этим динамометром.

С увеличением жесткости динамометра, что соответствует уменьшению времени приложения усилия, начальная сила трения растет. Сила трения при достаточно жестком динамометре лежит близко к установившемуся кинетическому трению, которое не зависит от жесткости динамометра (прямая 2).

Из сказанного следует, что измеряемая начальная сила трения зависит от жесткости динамометра и является поэтому условной.

При приложении тангенциальной силы, кроме скольжения, наблюдается эластический сдвиг образца, причем величина смещения зависит от высоты образца. Величина эластического сдвига пропорциональна

приложенной силе, тогда как скорость скольжения нелинейно зависит от тангенциальной силы и при малых силах становится исчезающей малой. Вследствие этого, как отмечали Харри и Прок [8], исследование трения при малых силах затруднено.

Отсюда следует, что при малых допусках смещения эластический сдвиг, протекающий быстро, может полностью замаскировать скольжение резины чем жестче резина и меньше рабочая толщина образца, тем меньше вклад эластического смещения в общее.

На рис. 3 приведена зависимость между начальной силой трения, измеренной на маятниковом трибометре, и толщиной рабочей части образца при допуске смещения $X = 0,5 \text{ мм}$ и скорости тяги 50 мм/мин . В этих условиях в пределах толщин до 1 мм наблюдается практически одна и та же «сила трения». При больших толщинах измеряемая величина падает за счет все большего вклада эластиче-

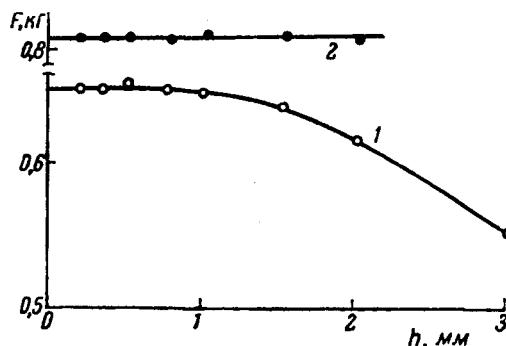


Рис. 3

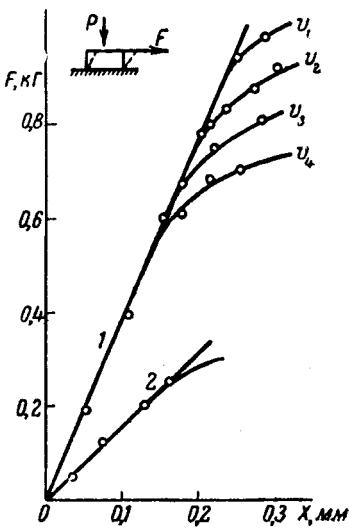


Рис. 4

Рис. 3. Зависимость между показанием динамометра и высотой рабочей части образца при трении резины СКН-26 по стали. Скорость тяги 50 мм/сек :

1 — начальное, 2 — установившееся трение

Рис. 4. Зависимость между тангенциальной силой и величиной смещения при трении резины НК по стали:

1 — при нормальной нагрузке — $1,4 \text{ кг/см}^2$ и скоростях тяги v : $v_1 = 0,8$, $v_2 = 8 \cdot 10^{-4}$, $v_3 = 8 \cdot 10^{-3}$, $v_4 = 8 \cdot 10^{-2} \text{ мм/сек}$; 2 — при нормальной нагрузке $0,8 \text{ кг/см}^2$ и скорости тяги $8 \cdot 10^{-4} \text{ мм/сек}$

ского сдвига в смещение образца. Эти данные приводят к выводу о непривидности маятникового трибометра для измерения трения в начальный момент сдвига. Там же на рис. 3 приведены данные для установившегося кинетического трения при той же скорости тяги, из которых следует независимость установившегося трения от толщины рабочей части образца.

Если образец резины, схематически изображенный в верхнем углу рис. 4, прочно прикрепить к твердой поверхности и приложить тангенциальную силу, то смещение X верхней плоскости образца, к которой приложена эта сила F , происходит только за счет деформации сдвига. Последовательные нагрузки и разгрузки показали, что резина из НК после разгрузки полностью восстанавливает свою форму (смещение равно нулю). Эти результаты позволили применить способ разгрузки как метод разделения общего смещения на обратимую и необратимую части, на что не обращалось внимания в прежних работах. Необратимая часть смещения относится к скольжению резины по твердой поверхности. Исключение эластического смещения особенно важно при испытании мягких резин, для которых модуль сдвига относительно мал.

На рис. 4 верхняя серия кривых показывает зависимость между тангенциальной силой и общим смещением при четырех скоростях тяги

щего устройства (жесткий динамометр). При малых силах данные ложатся на прямую линию, что свидетельствует о пропорциональности между напряжением и деформацией эластического сдвига. Чем жестче резина или больше нормальная нагрузка, тем ближе к вертикальной оси расположается эта прямая. С увеличением нормальной нагрузки наклон прямой возрастает, по-видимому, в связи с изменением толщины рабочей части образца и жесткости материала, находящегося в сложном напряженном состоянии.

Чем больше скорость возрастания тангенциальной силы, тем в более широком диапазоне изменения силы наблюдается чисто эластическое смещение. Разгрузка, применяемая в качестве контроля, неизменно показывала полное возвращение образца к исходному положению.

Обращает на себя внимание влияние скорости приложения тангенциального усилия на момент отхода данных от прямой. Момент отхода от прямой соответствует смещению образца относительно подкладки с допуском 0,05 мм и силе трения, которую мы будем называть условной статической силой трения.

Данные на рис. 2 и 4 согласуются друг с другом, поскольку и в том и в другом случае начальная сила трения тем больше, чем больше скорость приложения силы.

Приведенные данные отчетливо показывают, что начальное трение по своей природе является кинетическим, в связи с чем и наблюдается зависимость его от скорости нарастания тангенциальной силы. Поэтому измеряемую величину нельзя отождествлять со статическим трением, под которым понимается наличие на контакте двух поверхностей рубежной силы, ниже которой скольжение не наблюдается сколь угодно долго.

Из молекулярно-кинетической теории трения резины [3] следует, что статическое трение у резины в строгом смысле слова отсутствует. Однако на практике начальное трение может быть использовано как инженерная характеристика с учетом ее зависимости от временных факторов (времени неподвижного контакта, скорости приложения силы и др.). С этой практической целью начальное трение можно назвать условным статическим.

Выводы

- Предложена методика измерения трения высокоэластических материалов в начальный момент сдвига, свободная от недостатков прежних работ.

- Из результатов измерений трения резины по стали следует, что «статическое трение», определяемое как коэффициент трения в начальный момент скольжения, является условным, так как зависит от точности измерения смещения и скорости приложения тангенциальной силы.

- Условность коэффициента статического трения высокоэластических материалов особенно сильно проявляется при малых скоростях приложения тангенциальной силы, что связано с природой сухого трения каучукоподобных полимеров.

Московский педагогический институт
им. Потемкина

Поступила в редакцию
18 X 1959

ЛИТЕРАТУРА:

- A. Schallamach, Proc. Phys. Soc., B66, 386, 1953.
- V. Gough, Gummireibung, Deutsche Kautschuk-Gesellschaft, Vortragstagung, 1958, Mai, Köln; Kautschuk und Gummi, 11, 303, 1958.
- Г. М. Бартенев, Докл. АН СССР, 96, 1161, 1954.
- Г. М. Бартенев, З. Е. Стыран, Докл. АН СССР, 121, 87, 1958.
- F. Roth, R. Driscoll, W. Holt, Rubb. Chem. Techn., 16, 155, 1943.
- P. Thirion, Rubb. Chem. Techn., 21, 505, 1958.

7. D. Denny, Proc. Phys. Soc., B66, 724, 1953.
8. J. Hurry, J. Rock, India Rubb. World, 128, 619, 1953.
9. F. Boggis, V. Riemen, Rubber Age, 81, 613, 1957.
10. С. Б. Ратнер, В. В. Лаврентьев, Докл. АН ССР, 108, 461, 1956.
11. Г. М. Бартенев, З. Е. Стыран, Высокомолек. соед., 1, 978, 1959.

ON THE NATURE OF THE «STATISTICAL» FRICTION OF RUBBER-LIKE POLYMERS

G. M. Bartenev, V. V. Lavrentev

S u m m a r y

In the paper it has been stressed that actually no one has measured the static friction of rubber. The reason for this has been analyzed and a method has been proposed for measuring friction at the beginning of shear, free from the shortcomings of previous studies. The results of measurements have been presented, from which it follows that static friction, determined as the friction coefficient at the beginning of slip, is conditional since it depends upon the accuracy of the displacement determination and upon the rate of tangential stress application.