

УДК 678.01 : 53

ФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРОВ
В НЕУСТАНОВИВШЕЙСЯ СТАДИИ ТРЕНИЯ ПРИ ВЫСOKИХ
И НИЗKИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Г. М. Бартенев, А. И. Елькин

Трение высокоэластических полимеров в установившемся процессе детально исследовалось как при высоких, так и при низких температурах [1—4]. Неустановившееся трение, особенно в начальный момент сдвига, изучено далеко недостаточно, особенно если иметь в виду большую практическую важность коэффициента трения в момент сдвига. Известные нам данные о начальном трении резин [5, 6] относятся лишь к 20°. Между тем трение в начальный момент сдвига, особенно при низких температурах представляет большой практический интерес для расчетов фрикционных пар, применяемых в различных машинах.

В этой работе исследовали природу и закономерности трения ненаполненных сеточных полимеров (резин) из бутадиенитрильных (СКН-40, СКН-26, СКН-18) и бутадиен-стирольного каучука (СКС-30) по стали, льду, тefлону и резине на вакуумном трибометре в стеклообразном и высокоэластическом состояниях.

Рис. 1. Характерная зависимость силы трения от пути скольжения для полимеров:

F_0 — начальная, F_m — максимальная, F_∞ — установившаяся сила трения

испытания при низких температурах: трение при 20° и находятся в контакте с ней в процессе охлаждения до заданной температуры; 2) образцы приводятся в контакт с поверхностью трения после охлаждения до заданной температуры.

При испытании первым способом, когда образцы в процессе охлаждения до заданной температуры находятся в контакте с другой поверхностью трения, фиксируется площадь фактического контакта, сформированная при 20°. При испытании вторым способом при каждой более низкой температуре формируется все меньшая площадь фактического контакта в соответствии с возрастанием модуля упругости полимера.

Сила трения в неустановившемся периоде определялась в вакууме при различных заданных скоростях скольжения, но преимущественно при скорости 1 м/мин.

Наиболее общая зависимость силы трения от пути скольжения, наблюдаемая в температурной области перехода из высокоэластического в стеклообразное состояние, характеризуется кривой, проходящей через максимум (рис. 1). На кривой четко выявляются следующие характеристики: сила трения в начальный момент сдвига F_0 , максимальная сила трения F_m и сила трения при установившемся процессе скольжения F_∞ . Максимум силы трения объясняется тем, что при переходе от покоя к движению скорость скольжения возрастает до заданного значения, в соответствии с чем сила трения вначале растет [1, 2]. Но одновременно в процессе скольжения площадь фактического контакта падает до установленного значения, в связи с чем сила трения уменьшается пока не достигнет постоянной величины.

Температурные зависимости начальной, максимальной и установившейся сил трения, полученные при испытании первым способом, приведены на рис. 2. На температурной оси различаются 4 характерные области: I — высокотемпературная, где максимальная и установившаяся силы трения совпадают (выше 0°); II — верхняя переходная область, где все характеристики трения имеют различные значения; III — нижняя переходная область, где начальная и максимальная силы трения совпадают, и IV — низкотемпературная область, где все три характеристики практически совпадают. По данным, полученным при испытании вторым способом (рис. 3), также можно выделить аналогичные 4 области. Однако различие между максимальным и установившимся трением в области III невелико, ширина ее меньше, чем при испытании первым способом.

При охлаждении первым способом площадь фактического контакта «замораживается» и с понижением температуры остается большой. При скольжении резины «замороженная» площадь фактического контакта разрушается, в результате чего в области III наблюдается резкое различие между максимальным и установившимся трением (рис. 2).

При испытании вторым способом различие в области III между максимальным (или совпадающим с ним начальным трением) и установив-

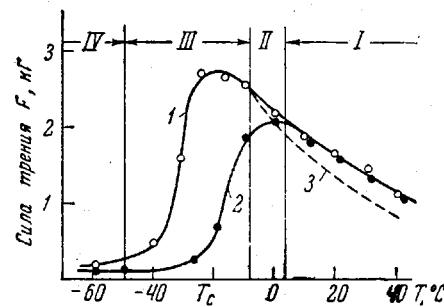


Рис. 2. Температурные зависимости силы трения резины из СКН-40 по стали, полученные первым способом:

1 — максимальное, 2 — установившееся, 3 — начальное трение. Скорость скольжения 1 мм/мин, нормальное давление 0,65 кг/см².

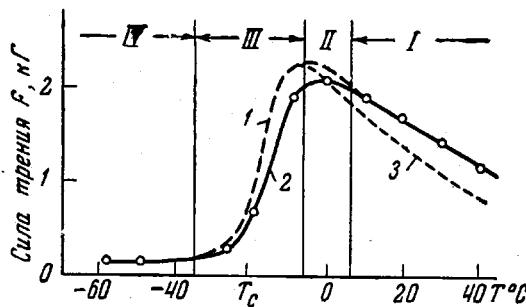


Рис. 3

Рис. 3. Температурные зависимости силы трения, полученные вторым способом, для того же материала и при той же нормальной нагрузке и скорости скольжения, что и на рис. 2:

1 — максимальное, 2 — установившееся, 3 — начальное трение

Рис. 4. Характерные зависимости силы трения от пути скольжения при различных температурах (пояснение в тексте)

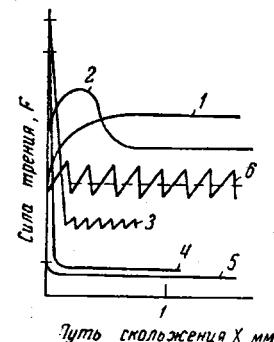


Рис. 4

шимся трением (рис. 3) объясняется зависимостью начальной силы трения от времени предварительного контакта. Этим же обычно объясняют механические релаксационные колебания, амплитуда которых определяется зависимостью начального трения от времени предварительного контакта и жесткостью системы [8, 9, 10].

В каждой из четырех областей наблюдается одна или несколько специфических зависимостей силы трения от пути скольжения (рис. 4). В области I сила трения в начальный момент сдвига имеет смысл

ного статического трения резины [5], она меньше максимальной силы трения, которая равна установившейся, т. е. $F_0 < F_m = F_\infty$ (кривая 1, рис. 4). В области II начальная сила трения и установившаяся меньше максимальной и все три силы трения различны по величине $F_0 \neq F_m \neq F_\infty$ (кривая 2, рис. 4). В области III начальная сила трения является одновременно и максимальной. Сила трения по мере скольжения образца резко падает, достигая в установившемся режиме наименьшего значения (кривые 3 и 4). Область IV характерна тем, что начальная сила трения равна максимальной, но к этому значению начального трения близок и значение силы трения при установившемся режиме $F_0 = F_m \cong F_\infty$ (кривая 5, рис. 4).

Если в областях I и II зависимости силы трения от пути скольжения 1 и 2 (рис. 4) характерны как для испытания первым, так и вторым способом, то в области III зависимости от пути скольжения, соответствующие первому и второму способам испытания, различны. При испытании первым способом сила трения резко падает по мере скольжения и достигает в установившемся режиме небольшого значения $F_\infty \ll F_0 = F_m$, причем начало области III характеризуется зависимостью силы трения от пути скольжения в виде кривой 3, когда после резкого падения силы трения наблюдаются релаксационные колебания, а конец области III (вблизи температуры стеклования) характеризуется кривой 4. При испытании вторым способом кривых типа 3 и 4 не наблюдается, область III характеризуется кривой 6 с релаксационными циклами.

Для инженерной практики представляет большой интерес максимальная сила трения, возникающая при испытании первым способом, так как при этом реализуются условия работы многих резино-металлических узлов.

Максимальная сила трения при понижении температуры растет и затем проходит через максимум (рис. 2). Рост, а затем падение максимальной силы трения с понижением температуры и отличие ее от установившейся силы трения объясняется следующим. Образцы резины охлаждаются в контакте с твердой поверхностью под нагрузкой. Площадь фактического контакта, сформированная при 20° , остается практически неизменной. Силы же сцепления резины с металлом с понижением температуры растут, поэтому растет и сила трения.

Возрастание максимальной силы трения резины с понижением температуры должно было бы наблюдаться все время. Однако оно продолжается лишь до некоторой температуры T_i , близкой к температуре стеклования T_c . Ниже T_i максимальная сила трения резко падает.

Это явление объясняется тем, что при понижении температуры из-за различия в линейных усадках резины и металла возникают напряжения, которые становятся столь большими, что при температуре T_i разрушают площадь фактического контакта. Разрушение контакта происходит не сразу, а постепенно, начиная с менее прочных участков контакта. Процесс разрушения контакта установлен нами прямыми методами наблюдения.

Если к образцам резины, находящимся под нагрузкой в контакте с металлом при 20° , приложить внешнюю тангенциальную силу, меньшую максимальной силы трения при 20° , но большую силы трения, соответствующей температурам ниже T_c , то при охлаждении произойдет самопрорезвильный сдвиг образцов, что указывает на резкое уменьшение площади фактического контакта.

Поскольку усадочные напряжения в полимере σ в паре с металлом достигают критического значения σ_k при температурах, близких к температуре стеклования T_c , то при переходе к морозостойким каучукоподобным полимерам максимум на температурной зависимости максимальной силы трения смешается в сторону низких температур. Например, для бутадиенитрильных сополимеров СКН-40 ($T_c = -20^\circ$), СКН-26 ($T_c = -30^\circ$) и СКН-18 ($T_c = -50^\circ$) наибольшее значение максимальной силы трения наблюдается соответственно при температурах -26 , -35 и

—53° (при нормальном давлении 0,65 кГ/см² и скорости скольжения 1 мм/мин).

В случае фрикционной пары резина — лед площадь фактического контакта практически не «замораживается», так как из-за низкого значения силы трения площадь фактического контакта с понижением температуры непрерывно разрушается небольшими усадочными напряжениями. Поэтому спад максимальной силы трения резины по льду наблюдается при охлаждении почти одновременно со спадом установившейся силы трения (рис. 5).

В работе Дерягина и Бутневича [11] показано, что возникающая при плавлении льда смазочная прослойка воды подчиняется законам граничного трения и в присутствии граничной смазочной прослойки воды коэффициент трения имеет малое значение. При низких температурах смазочная прослойка не образуется, и коэффициент трения достигает больших значений. Наблюданное падение силы трения ниже —50° (рис. 5) связано с резким уменьшением площади фактического контакта в результате стеклования полимера.

Напряжения, возникающие в резиновом образце в контакте с различными твердыми поверхностями при охлаждении, тем меньше, чем меньше различие в коэффициентах линейного термического расширения (или усадки) материалов фрикционной пары. Чем меньше различие в коэффициентах линейного расширения фрикционной пары, тем при более низкой температуре достигается критическое напряжение σ_c .

Коэффициенты линейного расширения тефлона α_1 и резины α_2 , в отличие от резино-металлической пары (коэффициент тепловой усадки металла на порядок меньше, чем у резины), сравнимы ($\alpha_2 \approx 2\alpha_1$). Поэтому напряжение при контакте резины и тефлона (рис. 6) достигает критического значения не при температуре стеклования резины T_c , как это наблюдается в случае резино-металлического контакта, а на 25° ниже.

Для пары резина — тефлон наблюдается высокое значение коэффициента трения (~1,5) при температурах выше

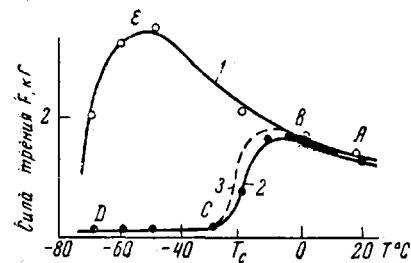


Рис. 5. Температурные зависимости силы трения резины из СКС-30 по льду:

1 — максимальное, 2 — установившееся трение. Скорость скольжения 5 мм/мин, нормальное давление 0,9 кГ/см²

T_c в то время как тефлон в паре с твердыми телами, в том числе и с застекленной резиной, дает весьма малые значения коэффициента трения, порядка 0,05—0,1 (рис. 6). Большую силу трения резины по тефлону выше T_c резины можно объяснить диффузионной теорией адгезии полимеров [12], так как в высокоэластическом состоянии цепи каучука или их участки легко диффундируют в поверхностный слой тефлона. В застекленном состоянии, при малой подвижности цепей каучука, диффузия не оказывает уже такого влияния, к тому же и площадь фактического контакта мала.

Изменение максимальной силы трения с понижением температуры при исследовании вторым способом (охлаждение образцов резины без контакта) проходит по кривой 3 (рис. 6). По этой же кривой проходит температурная зависимость максимальной силы трения в том случае, если после охлаждения образца первым способом постепенно повышать температуру до 20° .

Поскольку коэффициенты тепловой усадки фрикционной пары резина — резина одинаковы, то при понижении температуры напряжений в образцах возникать не будет. В этом случае площадь фактического контакта, сформированная при 20° , все время будет сохраняться с повышением температуры постоянной, а максимальная сила трения будет всегда увеличиваться в соответствии с ростом сил сцепления резины с резиной (кривая 1, рис. 7). Поэтому увеличение максимальной силы трения с понижением температуры будет характеризовать изменение адгезионного взаимодействия резины с резиной.

Рис. 7. Температурные зависимости силы трения резины из СКН-40 по этой же резине:

1 — максимальное трение при испытании первым способом; 2 — максимальное трение при испытании вторым способом; 3 — установившееся трение. Скорость скольжения 1 $\text{мм}/\text{мин}$, нормальное давление 0,65 $\text{kG}/\text{см}^2$

Если же измерять температурную зависимость максимальной силы трения резины по резине при повышении температуры, начиная от низких температур, то эта зависимость (кривая 2) практически совпадает с кривой для установившегося процесса трения (кривая 3).

Выводы

1. В общем случае у полимеров в процессе скольжения наблюдается начальная сила трения в момент сдвига, максимальная и установившаяся сила трения, причем численное соотношение между ними существенно зависит от физического состояния полимера и температуры.

2. При охлаждении резины в контакте с другой поверхностью площадь фактического контакта замораживается и максимальная сила трения растет вместе с силами сцепления. Для фрикционной пары с одинаковыми коэффициентами линейного расширения рост максимальной силы трения продолжается с понижением температуры неограниченно.

3. Для фрикционной пары с различными коэффициентами линейного расширения возникают напряжения, которые, нарастая при понижении температуры, превышают адгезионную прочность контакта и разрушают замороженную площадь фактического контакта тем раньше, чем большее различие в коэффициентах линейного расширения материалов фрикционной пары. В результате этого при некоторой температуре самопроизвольно происходит резкий спад силы трения полимера.

4. Снижение максимальной силы трения резино-металлического контакта при охлаждении в ряде случаев является благоприятным фактором для подвижных уплотнительных деталей, работающих в области низких температур.

Московский государственный
педагогический институт
им. В. И. Ленина

Поступила в редакцию
2 VII 1964

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Schallamach, Proc. Phys. Soc., **66**, 386, 1953.
 2. Г. М. Бартенев, З. Е. Стыран, Высокомолек. соед., **1**, 978, 1959.
 3. Г. М. Бартенев, А. И. Елькин, Докл. АН СССР, **151**, 320, 1963.
 4. K. Grosch, Nature, **197**, 858, 1963.
 5. Г. М. Бартенев, В. В. Ларентьев, Высокомолек. соед., **2**, 238, 1960
 6. С. Б. Ратнер, В. Д. Сокольская, Химич. пром-сть, 1955, № 1, 27.
 7. Г. М. Бартенев, А. И. Елькин, Заводск. лаб., 1963, № 2, 227.
 8. А. Ю. Ишлинский, И. В. Крагельский, Ж. техн. физ., **14**, 276, 1944.
 9. Б. В. Дерягин, В. Э. Пуш, Д. М. Толстой, Ж. техн. физ., **26**, 1329, 1956.
 10. Ю. И. Костерин, Механические автоколебания при сухом трении, Изд. АН СССР, 1960.
 11. Б. В. Дерягин, С. С. Бутевич, Ж. техн. физ., **22**, 1967, 1952.
 12. С. С. Вуюцкий, Аутогезия и адгезия высокополимеров, Гостехиздат, 1960.
-

THE FRICTION PROPERTIES OF POLYMERS IN THE NON-STEADY STATE STAGES OF SLIDING AT HIGH AND LOW TEMPERATURES

G. M. Bartenev, A. I. Elkin

Summary

The sliding friction of rubberlike polymers on various surfaces (steel, teflon, rubber, ice) has been investigated under non-steady state conditions over the temperature range from -100 to 50°. In general in the sliding process the frictional force passes through a maximum which appears immediately on slip at low temperatures and becomes diffuse or disappears entirely at high temperatures. As the temperature is lowered the maximum frictional force increases together with increase in the adhesion forces, whereas the area of actual contact formed at 20°C is congealed. As a result at low temperatures the frictional force at the onset of shear may be 10 to 40 fold that at the steady state, depending on the frictional pair. For some pairs there has been found at temperatures below the glass transition point a sharp decline in the maximum frictional force. This effect has been observed to be stronger and to set in earlier the greater the difference in the linear expansion coefficients of the two materials in contact and, on the contrary, it is not manifested at all in the case of contact of the same materials. The drop in maximum frictional force of a rubber-metal contact on cooling is in a number of cases a favorable factor for sliding packings operating at low temperatures.
