Доклады Академии Наук СССР
1954. Том XCIX, № 3

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

С. Б. РАТНЕР и В. Д. СОКОЛЬСКАЯ

ВЛИЯНИЕ ТВЕРДОСТИ РЕЗИНЫ НА КОЭФФИЦИЕНТ СТАТИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ БЕЗ СМАЗКИ

(Представлено академиком В. А. Каргиным 12 VIII 1954)

При трении резины по твердым материалам коэффициент трения μ зависит ([1-3]) от нагрузки N по формуле

$$\mu = \mu_\infty + \frac{F_0}{N}, \qquad (1)$$

где μ_∞ — минимальное значение, определяющее его величину при больших нагрузках (когда $F_0 \ll N$); F_0 — касательная составляющая силы молекулярного притяжения между телами, определяющая величину μ при малых нагрузках, когда слагаемое μ_∞ сравнительно мало*.

Эта формула основана на теории Дерягина о двучленном законе трения для твердых тел. Вместе с тем при трении скрещенных нитей ([8]) экспериментально показан совершенно одинаковый характер влияния нагрузки на трение твердых тел и высокополимеров.

Поэтому и при трении обычных образцов в отношении влияния нагрузки имеет место ([1-3]) одинаковый характер явления для твердых тел и резины. Что касается детального вида формулы, то она не должна быть тождественна для трения твердых тел и резины, поскольку последняя гораздо сильнее деформируется под влиянием нагрузки, причем не может не сказаться различие в твердостях самой резины. В самом деле, согласно этой формуле F_0 есть тангенс угла наклона прямой в координатах $\mu - 1/N$, если $F_0 = \text{const}$. Однако из рис. 1*а* для мягких резин наблюдается ([2]) существенное отклонение от прямолинейности.

В настоящей работе сделана попытка внести в формулу (1) уточнения, учитывающие два опытных факта, которые видны на этом

---

* Когда статья была в печати, появилась работа ([9]) о связи между силой трения покоя и «элементарными силами». В ней показано, что чем глаже поверхности, тем больше роль элементарных сил, возникающих между контактирующими телами. Эти результаты подкрепляют представления, на которых мы базируемся. Имеются лишь расхождения в терминологии. А именно, «элементарные силы» трения связаны с молекулярной шероховатостью (μ_1), которая была названа нами ([3]) микрошероховатостью, но должна называться ультрамикрошероховатостью ([4]), ибо термин микрошероховатость обычно применяют к поверхностям, «для которых трение покоя может быть объяснено при помощи известной модели двух напильников» ([9]); эту последнюю (μ_2) мы называли ([3]) макрошероховатостью, что не принято, ибо этот термин применяется для неровностей, различимых невооруженным глазом.

Исправим также некоторые опечатки в статье ([3]): на стр. 47, 3-я строка снизу вместо $\mu_\infty = \mu_2(1 - \mu_2)$ должно быть $\mu_\infty = \mu_1(1 + \mu_2)$; на стр. 49, 14-я строка снизу, вместо μ_∞ должно быть μ_2; в табл. 2 величина F_0 дана в Г/см², а не в кГ/см².

рисунке: угол наклона (т. е. F_0) уменьшается с увеличением $1/N$ (т. е. с уменьшением нагрузки); этот эффект тем больше, чем меньше твердость резины.

Оба явления могут быть поняты в свете теории Б. В. Дерягина [4], согласно которой F_0 пропорциональна площади истинного контакта, что получило экспериментальное подтверждение при исследовании трения разнообразных тел [1–5]. Исходя из этой идеи, попытаемся связать F_0 с удельной нагрузкой P и твердостью резины.

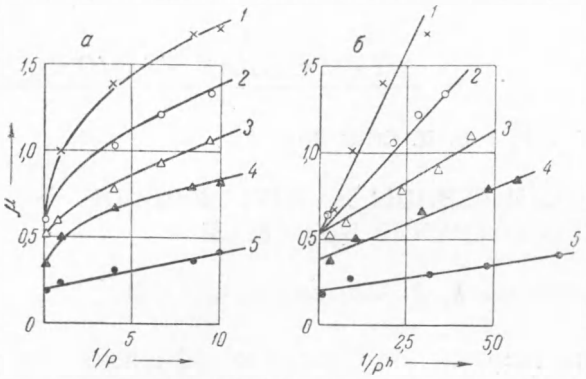


Рис. 1. Связь коэффициента трения μ с удельной нагрузкой P (в кГ/см²) при трении по стали резины на основе СКН-26, наполненной различным количеством графита C (в вес. част.), обладающей твердостью h: $1 - C = 10$, $h = 0{,}45$, $2 - C = 45$, $h = 0{,}65$; $3 - C = 60$, $h = 0{,}68$; $4 - C = 80$, $h = 0{,}73$; $5 - C = 120$, $h = 0{,}83$. $а$ — система координат $\mu - 1/P$, $б$ — система координат $\mu - 1/P^h$

Будем твердость резины характеризовать условной величиной h, заключенной в пределы от 0 до 1. Тогда F_0 может быть описано формулой

$$F_0 = ASP^{1-h}, \qquad (2)$$

поскольку площадь истинного контакта пропорциональна площади номинальной поверхности трения S. Эта формула качественно отражает оба отмеченных факта (симбатную роль нагрузки и антибатную роль твердости) и справедлива для крайних значений h: если тело пластическое ($h = 0$), то площадь контакта пропорциональна нагрузке

Таблица 1

Значения констант формулы (3) при трении резины по различным подкладкам*

Каучук	Наполнители	Вес. част.	h	лексиглас		АМГ-7		Сталь-25	
				μ_∞	A	μ_∞	A	μ_∞	A
НК	Нет	0	0,30	0,57	350	0,50	330	0,43	230
	Газовая сажа	40	0,60	0,57	35	0,50	35	0,43	20
СКБ-35	Нет	0	0,30	0,46	370	0,36	200	0,28	300
	Газовая сажа	60	0,62	0,47	130	0,38	90	0,30	80
СКН-26	Нет	0	0,45	0,57	415	0,45	450	0,52	400
	Газовая сажа	45	0,68	0,62	130	0,35	120	0,59	115
	„ „	60	0,75	0,62	75	0,35	70	0,62	55
	„ „	120	0,92	0,52	40	0,32	35	0,39	30
	Мел	60	0,60	—	—	0,35	205	0,57	250
	„	120	0,62	—	—	0,30	60	0,35	35
СКС-30	Нет	0	0,46	0,70	350	0,60	400	0,60	375
	Графит	10	0,54	0,53	160	0,54	140	0,62	140
	„	50	0,65	0,55	65	0,54	65	0,51	65
	„	120	0,79	0,38	30	0,50	30	0,38	30
	Белая сажа	50	0,65	0,61	110	0,64	110	0,58	100
	„ „	120	0,89	0,49	30	0,51	30	0,48	30
Неопрен	Нет	0	0,49	0,27	155	0,32	60	0,26	110
	Ламповая сажа	50	0,70	0,27	90	0,32	20	0,24	35

* Величина A дана при условии, что N измеряется в граммах.

($F_0 = AN$), что приводит формулу (1) к закону Амонтона ($\mu = \text{const}$; см. [4]); если тело абсолютно твердое ($h = 1$), то на площадь контакта не влияет нагрузка ($F_0 = A = \text{const}$). Подставляя (2) в (1), получим:

$$\mu = \mu_\infty + \frac{A}{N^h}. \qquad (3)$$

Для проверки применимости этой формулы* следует нанести экспериментальные данные в координатах $\mu - 1/N^h$, ожидая что они лягут на прямую, тангенс угла которой есть A.

Чтобы выполнить эту задачу, твердость резины выразим величиной h в пределах $0 < h < 1$. Воспользуемся тем, что твердость резины согласно ГОСТ'у № 263-41 [6] выражается в единицах прибора (твердомер Шора), имеющего пределы от 0 до 100, причем все резины укладываются в интервал от 20 до 99. Будем считать h твердостью по Шору, деленной на 100. Этот прием носит эмпирический характер. Прибегнув к нему ввиду недостаточности современных знаний о твердости материалов, о механических свойствах резины и о трении, посмотрим, насколько он допустим в области, где переплетаются упомянутые явления. На рис. 1*б* видно, что формула (3) удовлетворительна.

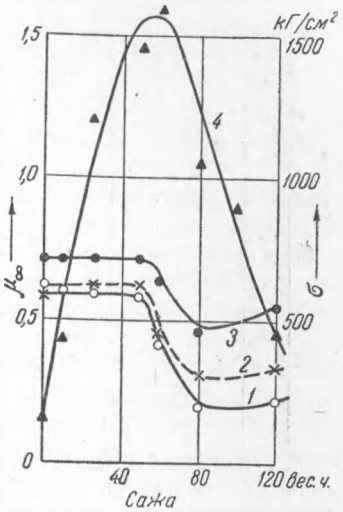


Рис. 2. Сравнение влияния количества сажи (в резине на основе СКС-30) на минимальный коэффициент трения μ_∞ (кривые *1*, *2* и *3*) и истинную прочность резины σ (кривая *4*). *1* — трение резины по стали; *2* — по алюминийсодержащему сплаву АМГ; *3* — по плексигласу

Аналогичные данные получены при трении по стали, по алюминиево-магниевому сплаву АМГ и по плексигласу различных резин на основе других каучуков, наполненных графитом, мелом, сажей и двуокисью кремния. Константы уравнения (3) приведены в табл. 1. Эти данные находятся в согласии с работами [1-3]. Тот факт, что μ_∞ отлично от нуля, говорит о несправедливости теории и формулы Шаламаха [7] $\mu = BN^{-1/8}$, опытные данные которого, не согласующиеся с его собственной формулой, удовлетворяют формуле (1).

Табл. 1 показывает, что величина A, характеризующая силы прилипания резины к подкладке, определяется, в основном, резиной (а не подкладкой), как наиболее мягким материалом, почти одинаково приспосабливающимся к рельефу различных подкладок, твердость которых много больше твердости резины; имеется лишь тенденция к увеличению A при переходе от более жестких подкладок к мягким в последовательности: сталь — сплав АМГ — плексиглас. Подобное явление значительно более ярко выражено при изменении твердости резины [2]: ее уменьшение существенно увеличивает A (почти независимо от того, какими путями меняется твердость резины) вследствие увеличения площади истинного контакта.

Данные таблицы показывают, что μ_∞ не меняется при наполнении резины, если наполнитель находится в пределах совместимости

---

* Отмеченное влияние твердости резины и удельной нагрузки P можно было бы выразить формулой $F_0/N = f(x)$, где безразмерная величина $x = E/P$ связана вместо твердости с физически более определенной величиной — модулем E. Однако попытки конкретизировать эту формулу в виде $f(x) = xe^{-x}$ и др. не привели в настоящее время к результатам, оправдывающимся на опыте.

с каучуком, т. е. пока все частицы наполнителя обволакиваются пленкой вулканизованного каучука. За этими пределами, когда частицы наполнителя становятся прослойкой между каучуком и подкладкой, μ_∞ снижается. Такой вывод подтверждается данными рис. 2, на котором разрывная прочность резины начинает снижаться при тех же количествах наполнителя, при которых уменьшается μ_∞, ибо каучук в смеси приобретает прерывную структуру. Предел совместимости отвечает приблизительно одинаковым объемным количествам разных наполнителей.

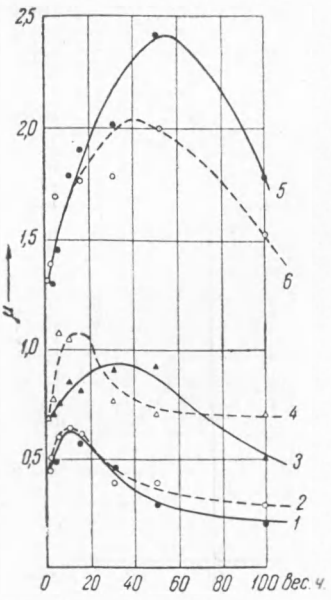


Рис. 3. Влияние количества мягчителя в резине (на основе СКН-26) на коэффициент трения μ при различных удельных нагрузках P: *1* и *2* — $P = 10$ кГ/см²; *3* и *4* — 1,3 кГ/см²; *5* и *6* — 0,1 кГ/см². *1*, *3* и *5* — мягчитель дибутилсебацинат; *2*, *4* и *6* — триэтиленгликольдибутират

Влияние мягчителя на трение резины можно рассматривать аналогично влиянию наполнителя. Из рис. 3 видно, что до тех пор, пока мягчитель находится в пределах совместимости с каучуком (т. е. набухает без выпотевания), его введение, уменьшая твердость, увеличивает коэффициент трения, что сказывается на A (а не на μ_∞), т. е. в области малых нагрузок (см. формулу (3)). Когда же мягчитель выпотевает, он играет роль смазки, что сказывается и на уменьшении μ_∞, т. е. и в области больших нагрузок. Возможно, что процесс выпотевания (выпрессовывания) мягчителя облегчается при больших нормальных нагрузках, что смещает предел совместимости.

При количествах мягчителя, которые выходят за пределы совместимости, трение уже нельзя рассматривать как сухое, ибо μ зависит (симбатно) от длительности неподвижного контакта, и данные не укладываются в формулу (3), справедливую для трения без смазки.

Итак, общие выводы: пока ингредиенты резиновой смеси находятся в пределах совместимости с каучуком, величина μ_∞ (играющая роль при больших нагрузках) не зависит от ингредиентов, она определяется лишь взаимодействием пленки каучука с подкладкой; твердость резины, зависящая от количества и характера ингредиентов (наполнители, мягчители), влияет на величину F_0 (в том числе на константу A), играющую роль при малых нагрузках.

Авторы благодарны Б. В. Дерягину за дискуссии.

Научно-исследовательский институт
резиновой промышленности

Поступило
27 V 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] С. Б. Ратнер, ДАН, **83**, № 3 (1952). [2] С. Б. Ратнер, В. Д. Сокольская, ДАН, **86**, № 1 (1952). [3] С. Б. Ратнер, ДАН, **93**, № 1 (1953). [4] Б. В. Дерягин, Что такое трение, Изд. АН СССР, 1952. [5] И. В. Крагельский, Сборн. Трение и граничная смазка, ИЛ, 1953, стр. 3. [6] Резина, Методы испытаний, 1947. [7] A. Schallamach, Proc. Phys. Soc., **65**, B, 658 (1951); перевод см. [5], стр. 109. [8] Б. В. Дерягин, С. Б. Ратнер, М. Ф. Футран, ДАН, **92**, № 6 (1953). [9] А. В. Булгадаев, ДАН, **97**, № 5 (1954).