

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

С. Б. РАТНЕР и В. Д. СОКОЛЬСКАЯ

**ВЛИЯНИЕ НАПОЛНИТЕЛЕЙ РЕЗИНЫ НА КОЭФФИЦИЕНТ  
СТАТИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ**

(Представлено академиком П. А. Ребиндером 11 VII 1952)

1. Одним из авторов (1) было показано, что при статическом трении резины по металлам и плексигласу коэффициент трения  $\mu$  уменьшается с увеличением нагрузки  $N$  согласно формуле

$$\mu = \mu_{\infty} + \frac{A}{N}, \quad (1)$$

где  $\mu_{\infty}$  — минимальное значение коэффициента трения покоя, имеющее место при  $N \rightarrow \infty$  или когда  $A \ll N$ ;  $A$  — касательная составляющая сил молекулярного взаимодействия членов трущейся пары.

В цитированной работе было показано, что при изменении рода металла и температуры поверхности величины  $A$  и  $\mu_{\infty}$  изменяются не пропорционально друг другу, вопреки формуле Б. В. Дерягина (2).

В настоящей работе рассматривается вопрос о влиянии на величину  $A$  (а также на  $\mu_{\infty}$ , а следовательно, и на коэффициент трения  $\mu$  в целом) различных наполнителей резины, количество и характер которых определяют величину сил взаимодействия образца резины с подкладкой при статическом трении.

2. Как известно, одним из наиболее употребительных ингредиентов резиновых смесей является сажа, служащая активным наполнителем. Увеличение количества сажи приводит к повышению твердости резины, в результате чего можно ожидать ослабления взаимодействия резины с жесткой подкладкой (металл, плексиглас) вследствие уменьшения истинной поверхности контакта между ними. Поэтому увеличение количества сажи в резине может вызвать уменьшение коэффициента трения за счет уменьшения величины  $A$ . Для изменения же величины  $\mu_{\infty}$  никаких очевидных причин предвидеть а priori нельзя, если исходить из данной Б. В. Дерягиным (2) интерпретации двучленного закона трения.

Данные экспериментального исследования приведены на рис. 1.

Как и в предыдущей работе (1), они изображены в координатах  $\mu = f\left(\frac{1}{N}\right)$  для проверки справедливости формулы (1), требующей прямолинейной зависимости в этой системе координат, если  $A$  не зависит от нагрузки  $N$ .

Из рисунка видно, что прямолинейность достаточно хорошо выполняется, т. е. что формула (1) справедлива для всех исследованных

резин\*. Это позволяет определить из графика  $\mu_{\infty}$  как начальную ординату, и  $A$  как тангенс угла наклона прямых.

В отношении величины касательных сил прилипания  $A$  опыт показывает, что, во-первых, уменьшение количества сажи приводит к более крутому наклону прямых ( $A$  увеличивается), во-вторых, этот наклон сохраняется при переходе к другому металлу и даже к плексигласу для каждой резины, содержащей заданное количество сажи.

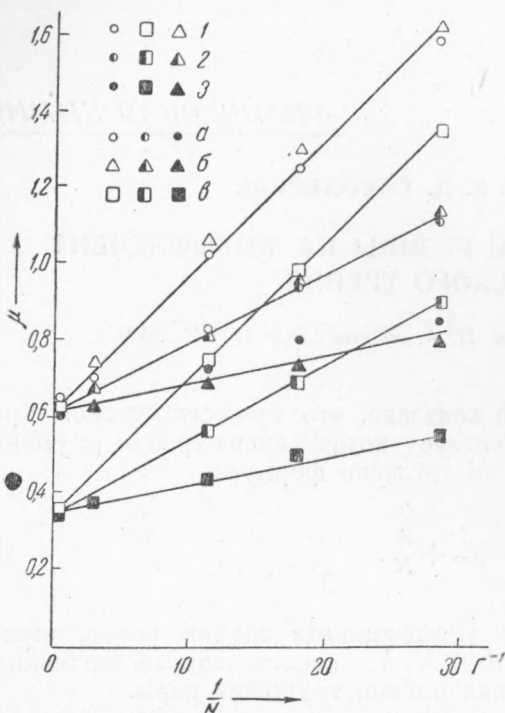


Рис. 71. Зависимость коэффициента трения саженасыщенных резин от обратной нагрузки. 1—резина содержит 10 вес. частей газовой сажи; 2—45 в. ч.; 3—60 в. ч.; а—трение резины по плексигласу; б—по стали; в—по алюминийсодержащему сплаву АМГ. Шероховатость стали больше, чем АМГ

лишь при переходе от одной подкладки к другой. Это обстоятельство еще на ряде примеров подтверждает отмеченное в предыдущей работе (1) отсутствие связи между  $A$  и  $\mu_{\infty}$ .

Интересно, что подобный нашему случай увеличения  $A$  (при сохранении постоянства  $\mu_{\infty}$ ) отмечен Б. В. Дерягиным и В. П. Лазаревым (3) при увеличении количества мультимолекулярных слоев кислото-бариевого или кальциевого мыла, служащего смазкой при трении стекла по парафину.

Независимость  $\mu_{\infty}$  от количества сажи говорит о том, что в условиях, когда влияние сил прилипания, связанных с твердостью резины, не имеет места (так как  $A \ll N$ ), коэффициент трения определяется лишь микрошероховатостью трущейся пары. Поскольку все образцы резины, независимо от содержания сажи, свулканизованы в одной и той же прессформе, то  $\mu_{\infty}$  сохраняется постоянным при трении по данной подкладке всех этих резин, изготовленных на основе одного каучука. Так как частицы наполнителя обволакиваются каучуком, то,

Первое обстоятельство находится в соответствии с соображениями о роли твердости резины, высказанными выше.

Второе обстоятельство (отмеченное еще в предыдущей работе (1), при сравнении трения резины по двум разным металлам) говорит о том, что силы прилипания определяются, главным образом, приспособлением поверхности более мягкого компонента трущейся пары (резины) к поверхности более твердого компонента пары, так что замена последнего (замена одного металла другим или даже плексигласом), служащего твердой подкладкой, не влияет на силы прилипания, а следовательно, и на величину  $A$ .

3. В отношении величины  $\mu_{\infty}$  из опытных данных следует, что она не зависит от количества сажи в резине (см. рис. 1).  $\mu_{\infty}$  меняется

\* На вопросе об отклонениях от прямолинейности, особенно существенных для мягких резин, мы здесь останавливаться не будем, ибо это не влияет на характер наших выводов.

сохраняя последний, можно ожидать постоянства  $\mu_{\infty}$  (пока обволакивание достаточно полное).

Отсюда вытекает, что при замене одного наполнителя другим величина  $\mu_{\infty}$  не изменится, ибо качество наполнителя не должно играть роли, поскольку не играет роли его количество. Экспериментальная проверка этого предположения дана на рис. 2.

Из графика видно, что, независимо от количества и качества наполнителей резины, при ее трении по данной подкладке  $\mu_{\infty}$  сохраняет свое значение. Из соответствующей точки на оси ординат лучами расходятся прямые для резин, включающих равные и разные количества различных наполнителей.

Наличие этого факта (при использовании наполнителей различного характера) говорит об общности отмеченного явления как для неактивных наполнителей (мел), так и для активных наполнителей (сажа разнообразных типов).

4. Следует отметить, что, несмотря на различный характер использованных наполнителей, влияние количества каждого из них на константу  $A$  (характеризующую силы прилипания и увеличивающуюся при уменьшении твердости) однотипно: уменьшение количества любого наполнителя увеличивает угол наклона, увеличивает роль сил прилипания, увеличивает суммарный коэффициент трения  $\mu$ .

При этом возникает вопрос о предельных значениях величины  $A$ : с одной стороны, об одном максимальном значении  $A$ , соответствующем полному отсутствию любого наполнителя; с другой, о различных минимальных значениях  $A$ , соответствующих наибольшим количествам различных наполнителей. Не будем останавливаться здесь на первом обстоятельстве — о едином значении максимальной величины  $A$ , ибо качественно оно вполне очевидно. Второй же вопрос связан с хорошо известной способностью того или иного наполнителя по-разному смешиваться с данным каучуком, что определяет предельную совместимость, т. е. предельно допустимое количество ингредиента в резиновой смеси; за этими пределами, повидимому, нарушается отмеченное выше обволакивание частиц наполнителя пленкой каучука.

Вблизи этих пределов совместимости часть наполнителя, находящаяся около поверхности образца, может оказаться очень слабо связанной с образцом и даже служить смазкой. Такое явление довольно ясно обнаруживается при использовании в качестве наполнителя графита, смазывающая способность которого общеизвестна.

В этом случае наши опыты показали, что характер влияния графита как наполнителя на коэффициент трения резины тот же, что и

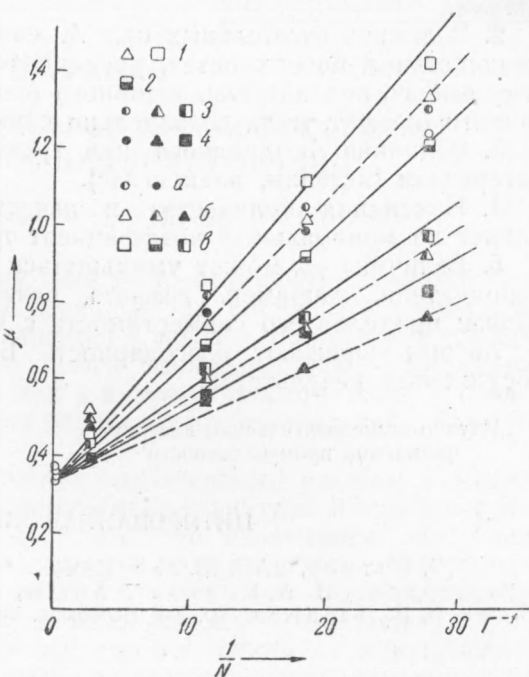


Рис. 2. Влияние наполнителей резины на зависимость коэффициента трения по металлу (АМГ) от нагрузки. 1 — 10 вес. частей; 2 — 25 в. ч.; 3 — 45 в. ч.; 4 — 60 в. ч.; а — мел, б — сажа белая, в — сажа газовая

других (упомянутых) наполнителей. Специфика же графита проявляется в том, что он обнаруживает уменьшение величины  $\mu_{\infty}$  при достаточно большом увеличении количества графита.

### Выводы

1. При статическом трении резины по металлам и плексигласу константы  $A$  и  $\mu_{\infty}$  в формуле (1) меняются независимо друг от друга:  $A$  — за счет количества наполнителя,  $\mu_{\infty}$  — за счет перемены подкладки.

2. Величина касательных сил  $A$ , связанных с молекулярным взаимодействием поверхностей, увеличивается при уменьшении количества любого наполнителя, активного (сажа, двуокись кремния) и неактивного (графит, мел), параллельно с уменьшением твердости резины.

3. Величина  $A$  одинакова при трении данной резины по разным материалам (металлы, плексиглас).

4. Изменения количества и качества наполнителя в резине не влияет на минимальный коэффициент трения  $\mu_{\infty}$ .

5. Величина  $\mu_{\infty}$  может уменьшаться при значительном количестве наполнителя, например, графита, начинающего играть роль смазки вблизи пределов его совместимости с каучуками.

Авторы выражают благодарность Б. В. Дерягину за участие в обсуждении результатов.

Научно-исследовательский институт  
резиновой промышленности

Поступило  
11 VI 1952

### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> С. Б. Ратнер, ДАН, 83, № 3 (1952). <sup>2</sup> Б. В. Дерягин, ДАН, 3, 93 (1934); Б. В. Дерягин, Н. А. Кротова, Адгезия, изд. АН СССР, 1939. <sup>3</sup> Б. В. Дерягин, В. П. Лазарев. Тр. 2-й Всесоюзн. конф. по трению и износу, 3, 1949.