

Д. В. КОНВИСАРОВ

К ТЕОРИИ КАЧЕНИЯ

(Представлено академиком А. И. Некрасовым 26 I 1952)

Вопрос о физической сущности трения качения до настоящего времени остается спорным. В литературе при изложении этого вопроса обычно ссылаются или на гипотезу несовершенной упругости реальных твердых тел ⁽¹⁾, или на гипотезу упругого скольжения ⁽²⁾, или, наконец, на гипотезу молекулярного взаимодействия ⁽³⁾. На основании общей молекулярной теории трения скольжения ⁽⁴⁾ последние две гипотезы можно считать принципиально совпадающими.

Согласно гипотезе несовершенной упругости, момент трения качения возникает вследствие асимметрии распределения напряжения сжатия на площадке соприкосновения тел.

В технических расчетах момент этот выражается уравнением:

$$M = R_n k,$$

где k (в мм) — величина смещения равнодействующей реакции R_n (в кг) от середины контактной площадки.

Величина k считается зависящей от свойств соприкасающихся тел и от состояния их поверхностей, а потому и называется коэффициентом трения качения. Величину k обычно предполагают не зависящей от радиуса кривизны катящегося тела. Предположение это, однако, нельзя признать достаточно обоснованным. Известно, что все явления, связанные с несовершенной упругостью реальных твердых тел (релаксация, упругое последействие, упругий гистерезис и др.), находятся в прямой зависимости и от степени неоднородности напряженного состояния и от величины наибольшего напряжения.

В случае качения цилиндра по какой-либо цилиндрической или плоской поверхности градиент напряжения и наибольшее напряжение сжатия на контактной площадке будут тем меньше, чем больше радиус катящегося цилиндра r . Это вытекает из известных формул для подсчета напряжений по Герцу.

Таким образом, если бы сопротивление качению было обусловлено одним только несовершенством упругости соприкасающихся тел, то с увеличением радиуса кривизны перекатывающегося цилиндра коэффициент трения качения должен был бы убывать (рис. 1, л).

Став на точку зрения гипотезы поверхностных молекулярных сил, мы приходим к обратному заключению. С увеличением радиуса кривизны катящегося цилиндра площадь соприкасания его с опорной поверхностью, согласно формулам Герца, возрастает. Если принять, что число пар взаимодействующих молекул прямо пропорционально

величине контактной площадки, и если, далее, предположить, что сопротивление качению находится в прямой зависимости от этого числа, то зависимость коэффициента k от радиуса r должна характеризоваться некоторой поднимающейся кривой *II* (рис. 1).

Достаточная обоснованность обеих вышеуказанных гипотез позволяет рассматривать момент трения качения как суммарный эффект, возникающий и от несовершенной упругости реальных твердых тел и от их молекулярного взаимодействия на контактной площадке, а коэффициент трения качения k — как сумму двух коэффициентов, различным образом реагирующих на увеличение радиуса кривизны катящегося тела.

В таком случае, согласно данным

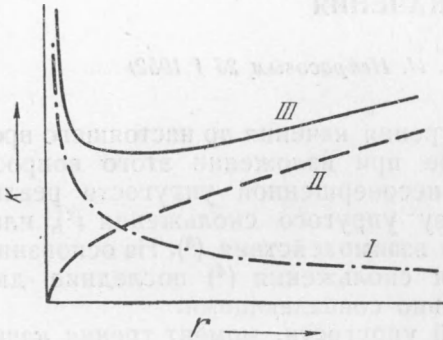


Рис. 1. Теоретические зависимости коэффициента трения качения k от радиуса кривизны r перекатывающегося цилиндра. *I* — зависимость, предполагаемая на основании гипотезы несовершенной упругости (ординаты кривой пропорциональны максимальным напряжениям сжатия на контактной площадке); *II* — зависимость, предполагаемая на основании гипотезы междумолекулярного взаимодействия (ординаты кривой пропорциональны величине контактной площадки); *III* — зависимость, предполагаемая при одновременном влиянии на процесс качения и фактора несовершенной упругости и фактора молекулярного взаимодействия (ординаты кривой равны сумме ординат кривых *I* и *II*)

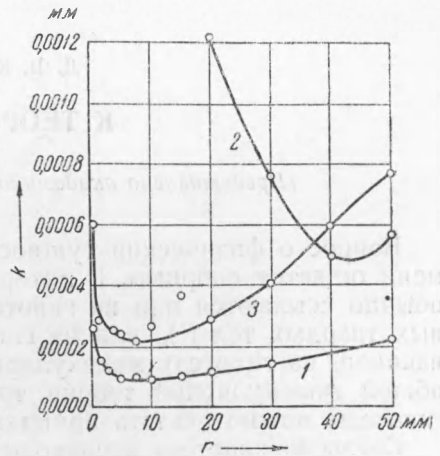


Рис. 2. Зависимости коэффициента трения качения k от радиуса кривизны r перекатывающегося цилиндра из шарикоподшипниковой стали, найденные экспериментальным путем. Вес маятника 13,4 кг, максимальная амплитуда колебаний $18,5 \div 19,6^\circ$, период колебаний $8 \div 82$ сек. *1* — при качении вдоль двух цилиндрических образцов радиусом 40 мм из той же стали (продолжительность каждого опыта 50–55 мин.); *2* — при качении вдоль двух цилиндрических образцов радиусом 30 мм из мягкой термически необработанной углеродистой стали (продолжительность каждого опыта 16 мин.); *3* — при качении по двум плоскостям опорного образца из мягкой термически необработанной углеродистой стали (длина контактной площадки на каждой плоскости 9 мм, продолжительность каждого опыта 16 мин.)

теоретической диаграммы рис. 1, зависимость коэффициента трения качения k от радиуса r должна характеризоваться кривой *III*, имеющей минимум (5).

Проведенные нами опыты дали уже подтверждение этой гипотезы.

Исследования проводились методом маятниковых колебаний. Подробное описание маятника и методики работы дано в (5).

Материал образцов, термическая обработка и окончательная отделка их соответствовали нормам, принятым для роликовых подшипников. Рабочие поверхности образцов промывались перед опытами четыреххлористым углеродом и протирались активированным углем.

В первой серии опытов (рис. 2, *1*) каждый образец из шарикоподшипниковой термически обработанной стали ($R_c = 61 \div 62$), закреп-

ленный в маятнике, перекачивался вдоль образующих двух цилиндрических образцов из той же стали, закрепленных в стойке.

Во второй серии опытов (рис. 2, 2) те же самые закрепленные в маятнике образцы перекачивались по образующим двух цилиндрических образцов, изготовленных из термически необработанной углеродистой стали с твердостью $H_B = 156$; наконец, в третьей серии опытов опорной поверхностью для тех же цилиндрических образцов из шарикоподшипниковой стали служили две прямоугольные плоскости образца из термически необработанной углеродистой стали с твердостью $H_B = 150$.

Достаточно плотный контакт и равномерное прилегание цилиндрических поверхностей к плоскостям были достигнуты надлежащей пригонкой плоскостей. Как показано на рис. 2, для каждого исследованного случая зависимость k от r , в полном соответствии с нашей гипотезой, представляется кривой, имеющей минимум.

Резкое смещение точки минимума, обнаруженное во второй серии опытов, наглядно показывает, что полученные результаты не зависели от изменений размеров маятника, связанных с закреплением в нем образцов различных типов и добавочных гирь, с помощью которых поддерживалось постоянство абсолютной нагрузки на образцы.

В проведении опытов принимала участие А. А. Покровская.

Выражаю глубокую признательность С. В. Пинегину за содействие в проведении настоящей работы.

Уральский политехнический институт
им. С. М. Кирова

Поступило
24 VII 1951

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ А. Ю. Ишлинский. Труды I Всесоюз. конференции по трению и износу в машинах, 2, 255, изд. АН СССР, 1940. ² O. Reynolds, Phil. Trans. Roy. Soc. of London, 166, 155 (1876). ³ G. A. Tomlinson, Phil. Mag. and Journ. Sci., № 46, 905 (1929). ⁴ Б. В. Дерягин, ЖФХ, 5, № 9 (1934). ⁵ Д. В. Конвисаров, Труды Сиб. физ.-техн. ин-та, в. 28, 223, Томск (1949).