

## ТРЕНИЕ КАЧЕНИЯ.

Из опыта человеческой деятельности известно, что работа, требуемая для качения тел друг относительно друга, обычно намного меньше, чем работа, необходимая для скольжения этих тел.

*Трение качения* наблюдается, когда одно тело перекачивается по другому и при повороте одного из которых относительно мгновенного или постоянного центра в контакт вступают новые участки поверхностей трения. Относительные скорости разных точек катящегося тела различны и определяются их удалением от контактной площадки (рис.).

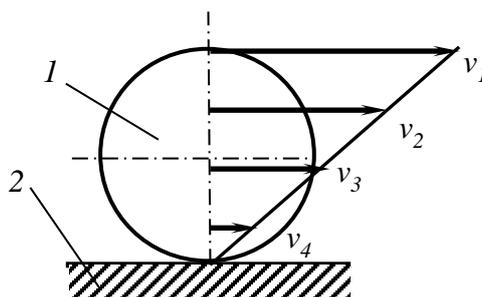


Рис. Трение качения: 1 – перемещающееся тело, 2 – неподвижное тело

Трение качения встречается в подшипниках качения, парах колесо–рельс, ролик – транспортирующая лента конвейерных систем и др. Различают *чистое качение* и *качение с проскальзыванием*.

*Чистое качение* – контакт тел является идеально упругим и происходит по линии (для цилиндра) или в точке (для сферы).

Качение будет чистым, если при повороте тела на малый угол  $\varphi$  его ось смещается на величину  $R \cdot \varphi$ . Точки касания тела с основанием неподвижны относительно последнего.

На практике всегда реализуется *качение с проскальзыванием*.

*Качение с проскальзыванием* – контакт двух тел осуществляется по некоторой поверхности вследствие упругопластических и вязкопластических деформаций (рис.).

Контакт реальных тел качения представляет собой площадку конечных размеров, а не точку или линию, тогда линия действия реакции  $F_n^*$  плоскости не совпадает с линией действия нормальной силы  $F_n$ . Точка ее приложения смещается от центра контактной площадки к ее передней границе.

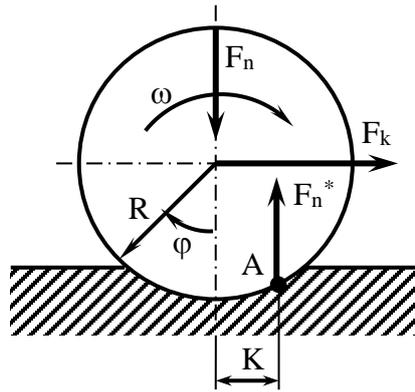


Рис. Схема качения колеса по плоскости

При качении колеса по деформируемой под нагрузкой  $F_n$  поверхности, к нему надо приложить момент вращения  $F_k \cdot R$  для поддержания равномерного движения. Этот момент уравнивается реактивным моментом  $F_n^* \cdot K$ , возникающим вследствие того, что реакция  $F_n^*$ , численно равная внешней нагрузке  $F_n$ , смещена на величину  $K$  относительно линии действия силы  $F_n$ .

Составив уравнение моментов относительно точки  $A$ , получим:

$$\sum M_A = F_k \cdot R - F_n^* \cdot K = 0,$$

$$K = \frac{F_k \cdot R}{F_n^*} = f_k.$$

Смещение  $K$  называется *коэффициентом трения качения*, имеющим *линейную размерность*.

Наряду с этой величиной употребляется безразмерная величина  $f_c$  – коэффициент сопротивления качению:

$$f_c = \frac{K}{R} = \frac{f_k}{R} = \frac{F_k}{F_n^*}$$

При использовании этого коэффициента необходимо указывать, на каком радиусе получено значение  $F_k$ .

### Природа трения качения.

Согласно современным представлениям, при качении упругого колеса по упругому полупространству сопротивление качению  $F_k$  обусловлено тремя причинами: гистерезисными потерями  $F_1$ , микропроскальзыванием в зоне контакта  $F_2$  и адгезией в контактной зоне  $F_3$ :

$$F_k = F_1 + F_2 + F_3.$$

В реальных условиях при качении тела могут наблюдаться все три составляющие трения качения одновременно (рис.).

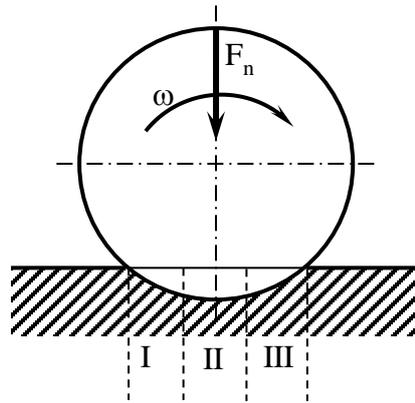


Рис. Зоны локализации адгезионного взаимодействия, гистерезисных потерь и проскальзывания при качении цилиндра

На *первом участке* (рис. ) реализуется в основном адгезионное взаимодействие. На этом участке поверхности трения тел качения будут разделяться с разрывом адгезионных связей.

*Гистерезисные потери* (первый и третий участки) наблюдаются в областях максимальных деформаций сдвига и нормальных деформаций материалов контактирующих тел в направлении вектора скорости.

*Проскальзывание* реализуется на всей длине контакта (все три участка).

*Четвертая составляющая* трения качения – механические потери в смазочном материале (качение по смазке).

*Упругий гистерезис* возникает вследствие несовершенства упругих свойств реальных тел, участвующих в трении качения (рис.).

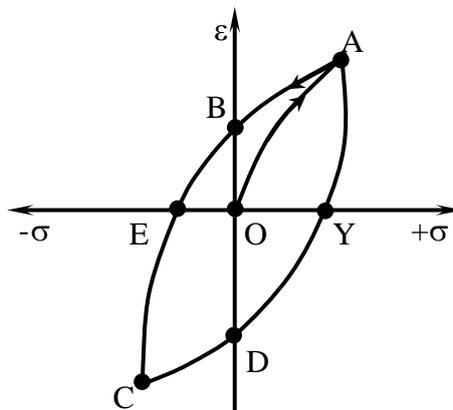


Рис. Петля гистерезиса при знакопеременном нагружении материала

Под влиянием напряжения  $\sigma$  возникает деформация  $\varepsilon$ , однако, поскольку тело не идеально упругое,  $\varepsilon$  не прямо пропорционально  $\sigma$  (нарушается закон Гука,  $OA$  не прямая). Если снять напряжение ( $\sigma=0$ ), остается остаточная деформация  $OB$ , для снятия которой требуется отрицательное напряжение  $OE$ , т.е. сжимающая нагрузка. Прикладывая последовательно положительное и отрицательное напряжения, получим петлю  $ABECDYA$ , которую называют петлей гистерезиса. Площадь петли численно равна работе, необратимо рассеянной за один цикл в единице объема.

Таким образом, каждый элемент плоскости, по которой катится цилиндр, испытывает последовательно цикл «нагрузка-разгрузка», который описывается петлей гистерезиса.

Физически гистерезис обусловлен переползанием дислокаций при нагружении. Увеличение числа дислокаций увеличивает гистерезисные потери.

Сила трения качения *жесткого цилиндра по упругому полупространству* описывается формулой:

$$F_k = \frac{4 \cdot \alpha_g \cdot F_n \cdot b}{3 \cdot \pi \cdot l \cdot R},$$

где  $b$  – полуширина площадки контакта,  $\alpha_g$  – коэффициент гистерезисных потерь (зависит от нагрузки, и вида деформирования),  $l$  – длина цилиндра,  $R$  – радиус цилиндра,  $F_n$  – нормальная нагрузка.

В общем случае гистерезисные потери обусловлены внутренним трением, а также пластическим деформированием микровыступов и пластическим оттеснением граничного смазочного слоя.

Теоретическое изучение сопротивления качению при несовершенной упругости было выполнено А. Ю. Ишлинским.

При качении *цилиндра по вязкоупругому основанию* для малых

скоростей  $F_k = c \cdot \frac{F_n \cdot v}{R}$ , для больших –  $F_k = c \cdot \frac{F_n^{3/2}}{(v \cdot R)^{1/2}}$ ,

где  $c$  – константа, включающая параметры модели,  $v$  – скорость качения.

Видно, что в интервале малых скоростей качения увеличение скорости приводит к росту сопротивления качения, а при больших скоростях – к его уменьшению.

Сопротивление качению *шара по поверхности пластического основания* выражается соотношением

$$F_k = \frac{F_n^{3/2}}{\pi \cdot R \cdot \sigma_n^{1/2}},$$

где  $\sigma_n$  – нормальные напряжения, зависящие от давления на контактной площадке и механических свойств тел качения.

Гистерезисная теория справедлива для качения твердых тел по резине, однако распространение ее на металлы не всегда оправдано.

Основной причиной сопротивления качению считается *проскальзывание*. Проскальзывание может быть обусловлено деформацией контактирующих тел (О.Рейнольдс) или различием в скоростях различных точек катящегося тела (А.Пальмгрен и Г.Хизкоут).

*Проскальзывание по Рейнольдсу* наглядно наблюдается при качении жесткого цилиндра по резине. За один оборот цилиндр проходит меньшее расстояние, чем длина его окружности. Это объясняется деформацией контактирующих тел. Под действием нормальной нагрузки материал основания деформируется и контакт осуществляется не по линии, а по площадке шириной  $AC$  (рис.). При этом материал цилиндра в зоне контакта сжат, а материал опорной поверхности растянут. Поэтому при повороте цилиндра освобождающиеся от контакта точки его поверхности будут стремиться удалиться друг от друга, а точки поверхности – сблизиться. Это приводит к проскальзыванию микроучастков контактирующих поверхностей одного тела относительно другого.

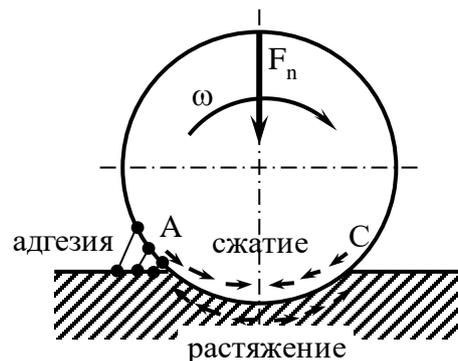


Рис. Деформации поверхностных слоев при контактировании цилиндра и плоскости

Вклад проскальзывания в сопротивление качению зависит от отношения радиуса шара к радиусу желоба.

В зоне  $AC$  (см. рис.) при качении поверхности будут разделяться с разрывом адгезионных связей, действующих между катком и поверхностью в зоне выхода трущихся тел из контакта. Этим фактором обусловлено проявление *адгезионной составляющей*  $F_3$  в контактной зоне.

Вклад в сопротивление качению микропроскальзывания и адгезии мал. Большую часть составляют гистерезисные потери.

### Факторы, влияющие на сопротивление качению.

*Нормальная нагрузка* – при качении тела по плоскости увеличение нормальной нагрузки вызывает монотонное повышение  $f_c$  (рис.) – зависимость близка к линейной. Это обусловлено одновременным ростом всех составляющих сопротивления качению: адгезионной (увеличение площади фактического контакта); проскальзывания (рост деформаций поверхностных слоев); гистерезисных потерь (увеличение доли пластических деформаций).

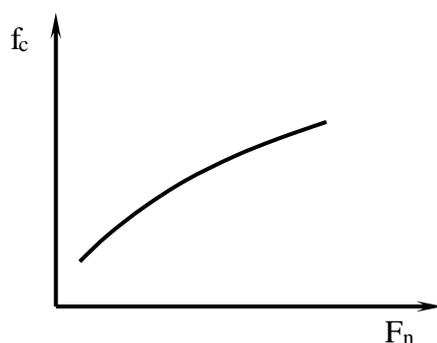


Рис. Влияние нормальной нагрузки на коэффициент сопротивления качению

*Смазка.* При высоких нормальных нагрузках численное значение коэффициента сопротивления качению в значительной степени определяется наличием в зоне контакта оксидных или смазочных пленок, разделяющих сопрягаемые детали. При обильной смазке (кривая 1 на рис.) коэффициент сопротивления качению принимает при прочих равных условиях более низкие значения, чем при обедненной подаче смазочных в зону трения (кривая 2 на рис.). Химическая очистка поверхности (кривая 3 на рис.) способствует повышению адгезионной составляющей и проскальзывания, что повышает сопротивление качению.

При малых значениях нагрузки применение смазочного материала снижает коэффициент сопротивления качению незначительно (на 10 – 15%), чем больше смазки, тем меньше сопротивление. Незначительное влияние вызвано компенсацией снижения затрат на проскальзывание и адгезию, затратами на преодоление внутреннего трения в слое смазочного материала.

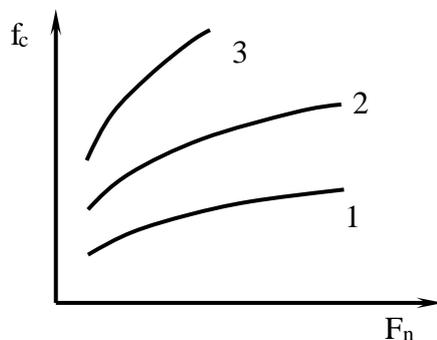


Рис. Влияние нагрузки и наличия смазочного материала на коэффициент сопротивления качению

*Размеры и форма тела качения.* С увеличением радиуса тела качения  $R$ , в области малых его значений, сопротивление качению уменьшается вследствие снижения гистерезисных потерь (больше радиус – меньше контактное давление, меньше доля пластических деформаций). С увеличением  $R$  в области больших значений преобладающим становится влияние адгезионной составляющей, которая растет с увеличением поверхности контакта.

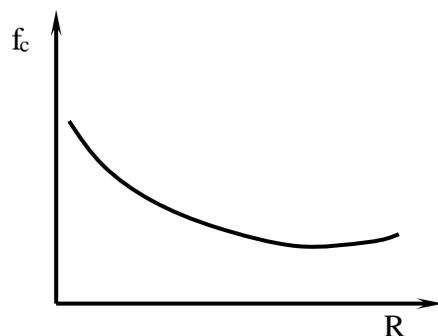


Рис. Зависимость коэффициента сопротивления качению от радиуса катящегося тела

Рост поверхностной *температуры* приводит к снижению физико-механических свойств тел в зоне контакта, что вызывает увеличение гистерезисных потерь (увеличение доли пластического деформирования) и адгезионной составляющей (увеличение площади фактического

контакта), следовательно, растет коэффициент сопротивления качению. Вид зависимости обуславливается зависимостью упругих свойств материалов тел от температуры.

*Микротвердость.* С увеличением микротвердости уменьшаются потери на проскальзывание и их деформацию, снижается глубина относительного внедрения поверхностей трения, что приводит к уменьшению площади фактического контакта и адгезионного взаимодействия. В итоге снижается сопротивление трению качения

Увеличение *скорости* вызывает монотонное увеличение  $f_c$ . Причем эта зависимость менее существенна для качения цилиндра по цилиндру, чем шара по шару.

К важным факторам, определяющим сопротивление тел качению, также относятся: отклонение их от правильной геометрической формы, шероховатость поверхностей, структура материалов тел качения. *Макрогеометрические отклонения* поверхностей тел качения от идеальной формы тел вращения вызывают рост коэффициента сопротивления и снижают его стабильность. При переходе от *шероховатой* к гладкой поверхности плоского тела сопротивление качению уменьшается в 2–3 раза.