

ГЛАВА V
МЕХАНИЧЕСКАЯ ПЕРЕДАЧА СИЛ И ЭНЕРГИИ
(ТРЕНИЕ, УДАР, ТЯГА)

§ 26. Трение. Тяга

Различают два вида трения: *трение скольжения* и *трение качения*.

Основной причиной возникновения трения скольжения является *макро- и микрошероховатость* соприкасающихся предметов. При движении одной поверхности вдоль другой их микроскопические выступы ударяются друг о друга и ломаются; вещество трущихся поверхностей размельчается, или, как говорят, *диспергируется*; это уже создает некоторую силу, задерживающую движение, всегда направленную против движения.

Нет таких твердых тел, поверхность которых была бы идеально гладка, поэтому работа, затрачиваемая на преодоление силы трения, всегда в той или иной мере идет на диспергирование (размельчение) поверхностных слоев трущихся тел. При этом значительная часть этой работы, производящей диспергирование поверхности, расходуется на нагревание трущихся тел, вызываемое ударами друг о друга размельченных частиц, скользящих по поверхности, и переходом энергии упругих напряжений в энергию молекулярного теплового движения.

Другая часть силы трения обусловлена микрошероховатостью поверхности, т. е. такими неровностями поверхности, которые соизмеримы по величине с размером молекул. В твердых кристаллических телах молекулы расположены закономерно, в определенном порядке. Из-за промежутков между молекулами даже так называемая зеркальная грань кристаллов (т. е. поверхность настолько ровная, что она отражает свет, как зеркало) является микрошероховатой.

Скольжение одной зеркальной грани кристалла по другой может сопровождаться «молекулярным диспергированием», т. е. нарушением порядка в естественном расположении молекул, отрывом и перемещением некоторых из них. Даже помимо такого разрушения молекулярного строения граней кристалла, скольжение одного кристалла по зеркальной грани другого вызывает вследствие микрошероховатости колебательное движение элементарных частиц

кристалла (молекул, атомов), вернее, усиливает всегда существующие колебания частиц, что приводит к нагреванию кристалла.

Чем глаже поверхности, тем в большем числе точек они соприкасаются при придавливании друг к другу; поэтому было бы ошибочно думать, что микрошероховатость мало влияет на величину трения в сравнении с макрошероховатостью.

Законы, которым подчиняется трение скольжения, были установлены французским физиком Амонтоном в 1699 г. и независимо от него, в более развитой форме, Кулоном в 1785 г. Если обозначить силу трения через F , а силу, с которой трущиеся поверхности прижимаются друг к другу, через P , то по закону Амонтона — Кулона

$$F = k_{\text{скольж}} P, \quad (1)$$

т. е. сила трения прямо пропорциональна силе, прижимающей поверхности тел. Здесь $k_{\text{скольж}}$ (часто мы будем писать просто k) представляет собой некоторый коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом трения скольжения¹⁾.

Приведем коэффициенты трения скольжения для некоторых случаев:

Сталь по стали	0,17
» » чугуну	0,17
Железо » железу	0,34
» » латуни	0,2
» » чугуну и бронзе	0,18
Бронза » »	0,22
Латунь » »	0,16
Дуб по дубу при параллельных волокнах	0,4
» » » перпендикулярных волокнах	0,2
Кожаный ремень по дереву	0,4
» » » чугуну	0,28
Кирпич по кирпичу	0,7
Сталь » льду	0,02
» » твердому грунту	0,2—0,4
» » рыхлому »	0,4—0,8
Резина (шина) по твердому грунту	0,4—0,6
Дерево (полозья) по льду	0,035

¹⁾ Один из простейших способов измерения коэффициента трения k заключается в определении угла α наклона плоскости, когда тело начинает скользить по плоскости под действием силы тяжести P .

Как ясно из рис. 38,

$$P \sin \alpha = k \cdot P \cos \alpha,$$

откуда

$$k = \operatorname{tg} \alpha.$$

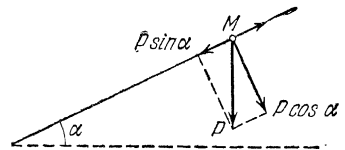


Рис. 38. К определению угла скольжения.

Угол, при котором происходит (под действием силы тяжести) равномерное соскальзывание тела по наклонной плоскости, называют *углом трения*. Коэффициент трения равен тангенсу угла трения.

Во многих случаях наблюдается, что трение между разнородными поверхностями меньше, чем между однородными. Этим часто пользуются в технике; например, вкладыши подшипников делают из другого металла, чем цапфы (концы вала). Чем тверже тела, тем трение меньше; подшипники в часовых механизмах изготавливают из очень твердых камней (например, агатов или алмазов).

Кулон предполагал, что коэффициент трения является величиной постоянной и не зависит ни от скорости движения, ни от величины давления, ни от площади трущихся поверхностей. Однако опытные исследования показали, что *трение скольжения уменьшается с увеличением скорости движения и несколько увеличивается при увеличении давления*. Например, сила торможения чугунными колодками стальных железнодорожных колес при скорости поезда в 100 км/час в четыре раза меньше, чем при 10 км/час, и в пять раз меньше, чем при начале движения поезда. Поэтому при остановке трамвайного вагона, когда скорость уменьшается и трение тормозных колодок о колеса сильно возрастает, тормоз во избежание толчков постепенно выключают.

Зависимость коэффициента трения от давления сказывается только при значительных давлениях. Так, коэффициент трения железа по железу при давлениях, не превышающих 18 кг/см^2 , как было указано в вышеприведенной таблице, равен 0,34; при давлении в 36 кг/см^2 он становится равным 0,41. При давлениях порядка 50 кг/см^2 трущиеся металлические поверхности (железо, чугун, латунь) существенно повреждаются. При дальнейшем увеличении давления коэффициент трения снова уменьшается. Так, коэффициент трения стали о чугун при давлениях порядка 500 кг/см^2 составляет всего 0,12, т. е. он в три раза меньше, чем при средних давлениях в $15\text{--}50 \text{ кг/см}^2$, когда он равен 0,4—0,3.

Во многих случаях изменение температуры способно сильно влиять на коэффициент трения скольжения. При скольжении металла по металлу температура двояким образом влияет на трение: с одной стороны, с изменением температуры меняется твердость трущихся поверхностей; с другой стороны, вследствие нагревания может значительно возрасти окисление поверхностей, что делает поверхности более шероховатыми. Наблюдения показали, что при скольжении железа по чугуну нагревание от нормальной температуры до 1000°C влечет за собой почти четырехкратное возрастание коэффициента трения, если не удалить окислы с трущихся поверхностей; если же окислы тщательно удалены, то коэффициент трения при указанном нагревании железа и чугуна сначала возрастает и при 700° приобретает почти в два раза большую величину, чем при нормальной температуре, но при последующем нагревании снова убывает и при 1000° снова становится таким же, как и при нормальной температуре.

Все сказанное выше относится к так называемому *сухому трению*, когда отсутствует *смазка* трущихся поверхностей. Известно, что смазка сильно уменьшает трение (в среднем в 8—10 раз). Причина уменьшения трения состоит в том, что масло заполняет все неровности трущихся поверхностей и располагается тонким слоем между ними так, что поверхности как бы перестают касаться друг друга, при этом скользят относительно друг друга отдельные слои жидкости.

Таким образом, смазка заменяет непосредственное трение двух твердых поверхностей трением внутри жидкости, которое называют *внутренним трением*, или *вязкостью*. Внутреннее трение различно для разных жидкостей. Например, в серном эфире оно в пять раз меньше, чем в воде, в смазочных маслах оно примерно в 80 раз больше, в глицерине при 3° в 2500 раз больше, чем в воде. Годной для смазки является лишь такая жидкость, которая не выдавливается из тонкого промежутка между трущимися поверхностями, поэтому жидкость, применяемая для смазки, должна быть достаточно вязкой.

Влияние различных факторов на трение при смазке впервые обстоятельно было изучено Николаем Павловичем Петровым. Он установил, что сила трения при смазке прямо пропорциональна скорости, величине поверхности трения, обратно пропорциональна толщине слоя смазки и зависит от ее физических свойств. Зависимость трения при смазке от физических свойств смазывающей жидкости выражается тем, что сила трения при смазке пропорциональна коэффициенту внутреннего трения смазывающей жидкости. Созданная Н. П. Петровым гидродинамическая теория смазки и описание опытов, предпринятых им для проверки и уточнения теории, были изложены Н. П. Петровым в четырех обширных монографиях «Трение в машинах». Всего Н. П. Петров посвятил вопросам трения в годы 1882—1905 около двадцати работ. В этих работах была подробно исследована зависимость трения при смазке от нагрузки, от скорости, от режима подачи смазки, от температуры и т. д.

Ряд вопросов трения при смазке был рассмотрен Рейнольдсом (1886 г.) и Зоммерфельдом (1904 г.). В наиболее строгой форме теория смазки была развита Н. Е. Жуковским и С. А. Чаплыгиным в работе «О трении смазывающего слоя» (1904—1906 гг.).

Обратимся к *трению катания*. Кулон нашел, что *трение катания* прямо пропорционально прижимающей силе P и обратно пропорционально радиусу катка r :

$$F = k_{\text{кат}} \cdot \frac{P}{r}, \quad (2)$$

где $k_{\text{кат}}$ — коэффициент трения катания.

Для опрокидывающей силы, которая преодолевает трение катания, радиус катка играет роль «плеча»; чем больше это плечо, тем легче преодолеть трение, приложенное к ободу катка. Кроме того,

чем больше радиус катка, тем меньше скажутся для него макроскопические неровности поверхности, как это видно из рис. 39.

Приводим коэффициенты трения катания (в сантиметрах) для некоторых случаев:

Колесо со стальным бандажом по стальному рельсу . . .	0,05
Чугунное колесо по стальному рельсу	0,12
Деревянный каток по дереву	0,16

Трение катания значительно меньше трения скольжения. В связи с этим применяют шарикоподшипники, в которых трение скольжения по втулке заменяется трением катания шариков или цилиндров (рис. 40).

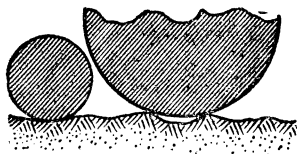


Рис. 39. Большие колеса испытывают меньшее сопротивление катания, чем малые.

Для обыкновенного подшипника скольжения при нормальной смазке сила трения на поверхности цапфы приближенно равна $F \approx 0,08 P$, где P — нагрузка на цапфу. Для шарикоподшипника сила трения на поверхности цапфы примерно в 50 раз меньше, чем для обыкновенного подшипника, и приближенно равна $F \approx 0,0015 P$.

Тяга. Тягой называют более или менее плавное изменение состояния движения тела, вызываемое силой, которую развивает другое тело и которая передается первому телу механически, т. е. упругим напряжением промежуточных тел или же трением (взаимное расположение движущего и движимого тел является несущественным; прицеплен ли паровоз впереди вагонов или же он находится в хвосте поезда и толкает вагоны перед собой — в обоих случаях поезд движется тягой паровоза).

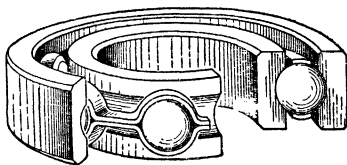


Рис. 40. Шарикоподшипник

Множество машин и механизмов предназначено для реализации тяги в различных условиях и для разнообразных целей. В таких машинах, как автомобиль, трактор и паровоз, тяга создается взаимодействием этих машин с землей; как уже было пояснено в § 15 (рис. 19), в этих случаях движущей силой («силой тяги») является трение, не позволяющее колесам скользить по поверхности дороги или рельсов; это трение называют иногда *ведущим трением*; оно приложено к ободьям колес в сторону, как всегда, противоположную относительному скольжению, т. е. как раз в ту сторону, куда катятся колеса.

Ведущее трение пропорционально силе, с которой вращаемые двигателем колеса прижаты к поверхности дороги или к рельсам, т. е. пропорционально той части веса паровоза, автомобиля, которая падает на ведущие колеса, — это так называемый *сцепной вес* P_0 . Если $k_{\text{скольж}}$ есть коэффициент трения скольжения между поверхностью колес и поверхностью дороги или рельсами, то сила тяги будет:

$$F_{\text{тяга}} = k_{\text{скольж}} \cdot P_0$$

(в тяговых расчетах коэффициент трения скольжения k между поверхностью ведущих колес и поверхностью дороги часто называют *коэффициентом сцепления*).

Для тракторов, движущихся по обыкновенным дорогам, коэффициент трения скольжения колес по дороге может изменяться примерно от $\frac{1}{5}$ до $\frac{4}{5}$, поэтому сила тяги трактора составляет, в зависимости от дороги и вида поверхности колес, одну, две, три и даже четыре пятых веса трактора.

Для скольжения стальных бандажей колес паровоза по стальным рельсам коэффициент трения примерно равен $\frac{1}{8}$. Поэтому сила тяги паровоза составляет одну шестую сцепного веса паровоза.

При скорости движения 20—40 км/час сопротивление железнодорожного состава качению (с учетом трения в осях при нормальной смазке) может быть принято равным примерно $\frac{1}{300}$. Следовательно, по горизонтальному пути паровоз может тянуть за собой поезд, вес которого в 300 раз превышает силу тяги паровоза, а так как сила тяги паровоза составляет примерно $\frac{1}{8}$ сцепного веса паровоза, то вес поезда (включая паровоз) может при строгой горизонтальности пути в 50 раз превышать сцепной вес паровоза. Железнодорожный путь стремится делать возможно приближающимся к горизонтальности, так как даже при небольшом подъеме в полградуса (это часто встречающаяся крутизна для магистралей) паровоз может тянуть за собой поезд, вес которого примерно только в 20—30 раз превышает сцепной вес паровоза.

При подъеме пути сопротивление, оказываемое поездом движению с равномерной скоростью, складывается из двух частей: из сопротивления качению и горизонтальной составляющей веса поезда.

Если угол подъема пути, измеренный в радианах, есть α , то горизонтальная составляющая веса поезда будет равна $P \cdot \sin \alpha$, или при малых углах подъема приближенно $P \cdot \alpha$ (принято подъемы пути измерять в «тысячных», т. е. указывать, какому числу тысячных долей радиана равняется α , общепринятое обозначение одной тысячной: $1^0/_{100}$). Нормально подъемы на железнодорожных магистралах не превышают $8-9^0/_{100}$; на подъездных железнодорожных ветках встречаются подъемы до $40^0/_{100}$.

На сопротивлении качению сказывается трение катания и трение в осях. Трение скольжения в осях сказывается тем слабее чем больше радиус колеса R в сравнении с радиусом оси (цапфы) r . В итоге сопротивление качению поезда или поковки при суммарном весе P равно

$$F_{\text{сопр}} = k_{\text{сопр. кач}} \cdot P,$$

где

$$k_{\text{сопр. кач}} = \frac{k_{\text{кат}}}{R} + \frac{k_{\text{смаз. осей}} \cdot r}{R}.$$

При подъеме пути сопротивление возрастает на величину $P \cdot \sin \alpha$.

Приводим коэффициенты сопротивления качению повок по различным дорогам (при обычном радиусе колес, нормальной смазке осей и небольшой для данного вида поковки скорости движения):

Вагоны по железнодорожным рельсам	0,003—0,005
Трамваи по рельсам городских железных дорог	0,005—0,007
Экипажи с железными шинами по асфальтовой дороге	0,015
» » резиновыми » » » »	0,025
» » железными » » булыжной мостовой	0,03—0,05
» » » » » грунтовой дороге	0,08—0,16

§ 27. Удар

Ударом называют внезапное изменение состояния движения тела вследствие столкновения его с другим телом. Во время удара оба тела претерпевают изменение формы (деформацию). Сущность удара заключается в том, что кинетическая энергия относительного