

трения в вакууме всегда больше, чем при обычных условиях (см. таблицу 2). Как отмечает лауреат Нобелевской премии по физике (1965 г.) Р.Фейнман в своих лекциях, «...Таблицы, в которых перечислены коэффициенты трения стали по стали, меди по меди и прочее, все это сплошное надувательство, ибо в них этими мелочами пренебрегают, а ведь они-то и определяют значение μ . Трение меди о медь и т.д. – это на самом деле трение о загрязнения, приставшие к меди».

Таблица 2

**Зависимость коэффициента трения
от окружающей среды**

Материалы	Коэффициент трения покоя	
	в вакууме	на воздухе
Сталь – сталь	0,8	0,3
Медь – медь	1,2	0,8

Можно, конечно, пойти по другому пути и, изучая трение меди по меди, измерять силы при движении идеально отполированных и дегазированных поверхностей в вакууме. Но тогда два таких куска меди просто слипнутся, и коэффициент трения покоя начнет расти со временем, прошедшем с начала контакта поверхностей. По тем же причинам коэффициент трения скольжения будет зависеть от скорости (расти с ее уменьшением). Значит, точно определить силу трения для чистых металлов тоже невозможно.

Тем не менее, для сухих стандартных поверхностей классический закон трения почти точен, хотя причина такого вида закона до самого последнего времени оставалась непонятной – ведь теоретически оценить коэффициент трения между двумя поверхностями никто так и не смог.

Как атомы трутся друг о друга: спрашиваем у ученых. Сложность изучения трения заключается в том, что место, где этот процесс происходит, скрыт от исследователя со всех сторон. Несмотря на это, ученые уже давно пришли к заключению, что сила трения связана с тем, что на микроскопическом уровне (т.е. если посмотреть в микроскоп) соприкасающиеся поверхности очень шероховатые, даже если они были отполированы (рис.18).

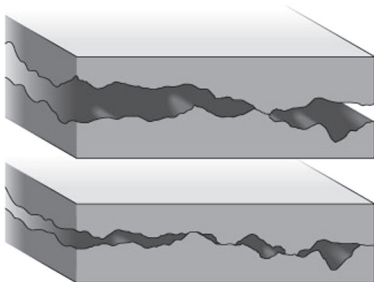


Рис.18. Схематическое изображение места контакта скользящих поверхностей при малой (вверху) и большой (внизу) сжимающей их силе

Поэтому скольжение двух поверхностей друг по другу может напоминать фантастический случай, когда перевернутые Кавказские горы трут, например, о Гималаи.

Прежде думали, что механизм трения несложен: поверхность покрыта неровностями, и трение есть результат следующих друг за другом циклов «подъем – спуск» скользящих частей. Но это неправильно – ведь тогда не было бы потерь энергии, а при трении расходуется энергия. Поэтому более правильной можно считать следующую модель трения. При скольжении трущихся поверхностей микронеровности задевают друг за друга, и в точках соприкосновения противостоящие друг другу атомы сцепляются. При дальнейшем относительном движении тел эти сцепки рвутся, и возникают колебания атомов, подобные тем, какие происходят при отпуске растянутой пружины. Со временем эти колебания затухают, а их энергия превращается в тепло, растекающееся по обоим телам. В случае скольжения мягких тел возможно также разрушение микронеровностей, так называемое «пропахивание», в этом случае механическая энергия расходуется на разрушение атомарных связей.

Таким образом, если мы хотим изучать трение, нам надо ухитриться двигать песчинку, состоящую из несколько атомов, вдоль поверхности на очень маленьком расстоянии от нее, измеряя при этом силы, действующие на эту песчинку со стороны поверхности. Это стало возможным после изобретения Г.Биннигом и Г.Рорером атомно-силовой микроскопии, за что в 1986 году им была присуждена Нобелевская премия по физике. Создание атомно-силового микроскопа (АСМ), способного чувствовать силы притяжения и отталкивания, возникающие между отдельными атомами, дало возможность, наконец, «пощупать», что такое силы трения, открыв новую область науки о трении – нанотрибологию.

Основой АСМ (рис.19) служит микрозонд, обычно сделанный из кремния и представляющий собой тонкую пластинку-консоль – ее называют кантилевером (от английского cantilever – консоль, балка). На конце кантилевера (длина 500 мкм,

ширина 50 мкм, толщина 1 мкм) расположен очень острый шип (высота 10 мкм, радиус закругления от 1 до 10 нм), оканчивающийся группой из одного или нескольких атомов. При перемещении микрозонда вдоль поверхности образца острие шипа приподнимается и опускается, очерчивая микрорельеф поверхности, подобно тому как скользит по грампластинке патефонная игла. На выступающем конце кантилевера (над шипом) расположена зеркальная площадка, на которую падает и от которой отражается луч лазера. Когда шип опускается и поднимается на неровностях поверхности, отраженный луч отклоняется, и это отклонение регистрируется фотодетектором. Данные фотодетектора используются в системе обратной связи, которая может обеспечивать либо постоянное удаление шипа от поверхности образца, либо постоянную силу давления острия на образец.

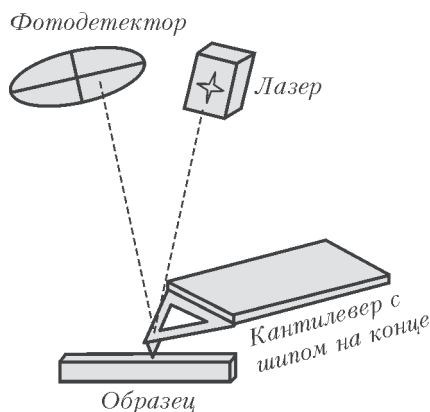


Рис. 19. Принцип устройства атомно-силового микроскопа

В первом случае пьезоэлектрический преобразователь может регистрировать движение кантилевера, прыгающего от одного атома исследуемой поверхности к другому, строя таким образом объемный рельеф поверхности образца в режиме реального времени. Разрешающая способность метода составляет примерно 0,1–1 нм по горизонтали и 0,01 нм по вертикали. Смещая зонд по горизонтали, можно получить серию рельефов и с помощью компьютера построить трехмерное изображение поверхности (рис.20).

С помощью АСМ с начала 1990-х годов проводятся систематические исследования силы трения микрозондов при их скольжении вдоль различных поверхностей и зависимости этих сил от силы прижатия. Оказывается, что для обычно используемых зондов, сделанных из кремния, микроскопическая сила трения скольжения составляет около 60–80% от прижимающей силы (рис.21, левый график). Как и следовало ожидать, сила трения скольжения растет с размером микрозонда, так как количество атомов, одновременно притягивающих его, увеличивается (рис.21,

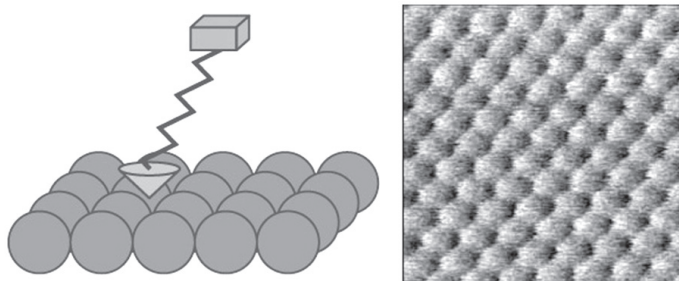


Рис.20. Схематическое изображение микрозонда атомно-силового микроскопа, скользящего над атомами поверхности на постоянной высоте (слева), и изображение поверхности NaF (2×2 нм), полученное с помощью этого микроскопа (справа)

правый график). Таким образом, сила трения скольжения микрозонда зависит от площади его контакта с поверхностью, что противоречит классическому закону трения. Выяснилось также,

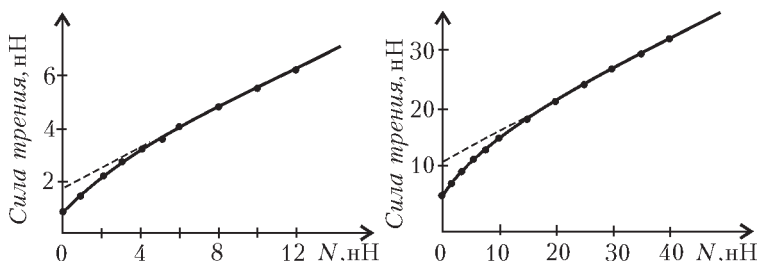


Рис.21. Зависимость силы трения скольжения микрозонда от внешней силы N , прижимающей его к графитовой поверхности. Левый график соответствует радиусу кривизны зонда 17 нм, правый — радиусу 58 нм. При малых N зависимость криволинейная, а при больших она приближается к прямой (обозначенной пунктиром)

что сила трения скольжения не становится нулевой при отсутствии силы, прижимающей микрозонд к поверхности. Да это и понятно — окружающие микрозонд атомы поверхности так близко расположены к нему, что притягивают его даже в отсутствие внешней силы сжатия. Поэтому и основное предположение классического закона — о прямой пропорциональной зависимости силы трения от силы сжатия — тоже не соблюдается в нанотрибологии.

Однако все эти расхождения между основным законом и данными нанотрибологии, полученными с помощью АСМ, легко

устраняются. При увеличении силы, прижимающей скользящее тело, увеличивается количество микроконтактов, а значит, увеличивается и суммарная сила трения скольжения. Поэтому никаких противоречий между только что полученными данными ученых и старым законом нет.

Долгое время было принято считать, что, принуждая одно тело скользить по другому, мы ломаем малые неоднородности одного тела, которые цепляются за неоднородности поверхности другого, а для того чтобы сломать эти неоднородности, и нужна сила трения. Поэтому старые представления часто связывают возникновение силы трения с повреждением микровыступов трущихся поверхностей, с их так называемым износом. Нанотрибологические исследования с использованием АСМ и других современных методик показали, что сила трения между поверхностями может возникать даже в тех случаях, когда они не повреждаются. Причиной такой силы трения служат постоянно возникающие и рвущиеся адгезионные связи между атомами.

Почему лед скользкий? Узнать, почему можно скользить по льду, ученым удалось только сейчас. А началось все давным-давно. В 1849 году братья Джеймс и Уильям Томсоны (последнему впоследствии за большие заслуги было присвоен титул лорда Кельвина) выдвинули гипотезу, согласно которой лед под нами под давлением плавится, и мы скользим уже не по льду, а по образовавшейся пленке воды на его поверхности.

Действительно, если увеличить давление на лед, то температура плавления льда понизится. Происходит это вот почему. Известно, что плотность льда меньше, чем у воды, и когда лед сжимают, он, пытаясь уменьшить деформацию, вызванную ростом давления, понижает температуру плавления. Это одно из проявлений принципа Ле Шателье: «Внешнее воздействие, выводящее систему из термодинамического равновесия, вызывает в ней процессы, стремящиеся ослабить результаты этого воздействия». Как показали расчеты и эксперименты, чтобы понизить температуру плавления льда на один градус, необходимо увеличить давление до 121 атм (12,2 МПа). Попробуем оценить, какое давление оказывает спортсмен на лед, когда скользит по нему на одном коньке длиной 20 см и толщиной 0,3 см. Если считать, что масса спортсмена 75 кг, то его давление на лед составляет около 12 атм. Таким образом, стоя на коньках, мы едва ли сможем понизить температуру плавления льда даже на 1 °С. Значит, объяснить скольжение по льду на коньках или, тем более, в обычной обуви, опираясь на

принцип Ле Шателье, невозможно, если температура за окном, например, -10°C .

Когда стало ясно, что понижением температуры плавления скользкость льда не объяснить, Ф.Бауден и Т.Хьюз в 1939 году предположили, что тепло, необходимое для плавления льда под коньком, дает сила трения. Однако эта теория не могла объяснить, почему так тяжело бывает даже стоять на скользком льду. С начала 1950-х годов ученые стали считать, что лед скользкий из-за тонкой пленки воды, образовавшейся на его поверхности в силу каких-то неизвестных причин. Только в конце 1990-х годов изучение того, как рассеивает лед рентгеновские лучи, действительно показало, что поверхность льда не является упорядоченной кристаллической структурой, а скорее похожа на жидкость (рис.22).

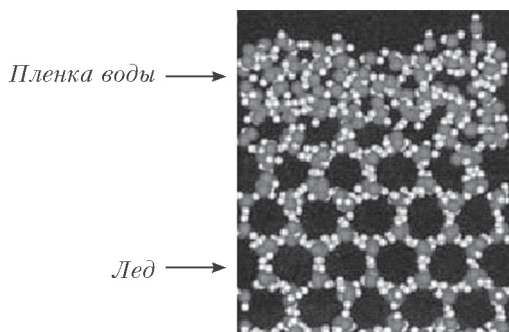


Рис.22. Схематическое изображение поперечного среза льда. Беспорядочное расположение молекул воды на поверхности соответствует пленке жидкости, а гексагональная структура в толще – твердому льду. Серые кружки – атомы кислорода, белые – водорода

Ученые объяснили это тем, что расположенные на поверхности льда молекулы воды пребывают в особых условиях. Силы, заставляющие их находиться в узлах гексагональной решетки, действуют на них только снизу. Поэтому поверхностным молекулам ничего не стоит «уклониться от советов» молекул, находящихся в решетке, и если это происходит, то к такому же решению приходят сразу несколько поверхностных слоев молекул воды. В результате на поверхности льда образуется пленка жидкости, служащая хорошей смазкой при скольжении. Кстати, тонкие пленки жидкости образуются не только на поверхности льда, но и у многих других кристаллов.

Толщина жидкой пленки растет с ростом температуры, так

как более высокая тепловая энергия молекул вырывает из гексагональных решеток большее число поверхностных слоев. Наличие примесей (молекул, отличных от воды) тоже мешает поверхностным слоям образовывать строгие кристаллические решетки. Поэтому увеличить толщину жидкой пленки можно, растворив в ней какие либо примеси, например обычную соль. Этим и пользуются коммунальные службы, когда борются зимой с обледенением дорог и тротуаров.

Трение качения – это совсем другое. В идеальном случае, когда диск, сделанный из несжимаемого материала, по инерции катится по гладкой недеформируемой поверхности, никакие силы трения на него не действуют (рис.23). Диск, касаясь поверхности в одной точке, вращается вокруг этой точки, потом точкой касания и центром вращения становится другая точка и так далее. При этом сила трения скольжения отсутствует.

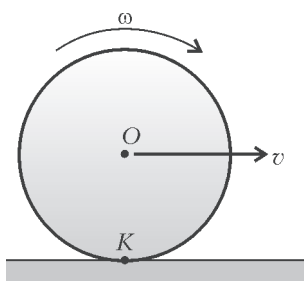


Рис.23. Качение несжимаемого диска радиусом R по несжимаемой поверхности; K – точка касания и мгновенный центр вращения диска с угловой скоростью ω , результатом которого является движение центра диска O со скоростью $v = \omega R$

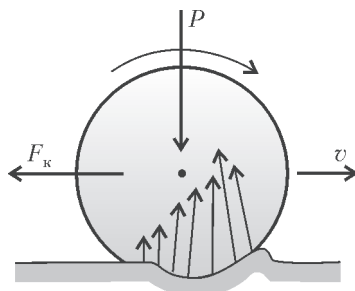


Рис.24. Возникновение силы трения при качении твердого диска по мягкой дороге со скоростью v ; из-за деформации поверхности дороги перед диском образуется бугорок, ответственный за силу трения качения

Однако в реальных условиях дорожное покрытие и материал, из которого сделан диск колеса, не являются абсолютно жесткими. Если поставить колесо на мягкую поверхность, надавить сверху силой P и пытаться, вращая колесо, продвинуть его вперед со скоростью v , то мы столкнемся с силой трения качения F_k . Колесо деформирует поверхность под собой так, что впереди появляется бугорок, который все время приходится преодолевать (рис.24). Горизонтальная составляющая сил реакции этого бугорка и представляет собой силу трения качения F_k . Так как

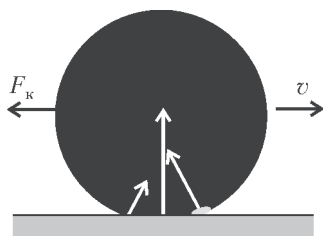


Рис.25. Возникновение силы трения при качении мягкого колеса по жесткой дороге. Деформация его передних участков больше, чем задних, что приводит к появлению силы трения качения

высота бугорка пропорциональна весу автомобиля, то и сила трения качения тоже пропорциональна весу автомобиля, равному силе реакции со стороны дороги N :

$$F_k = \mu_k N .$$

При качении мягкого колеса по твердой дороге на переднюю часть соприкасающейся с дорогой поверхности колеса все время «наезжают» (рис.25). Поэтому она сжимается больше, чем задняя, и сила реакции, действующая на переднюю часть колеса и направленная противоположно движению, оказывается

тоже больше. Сила трения качения равна разности горизонтальных составляющих сил реакции от передней и задней частей колеса. Так как сжатие колеса пропорционально весу машины, или силе реакции опоры, то

$$F_k = \mu_k N .$$

Силы трения качения определяются жесткостью материалов колеса и дорожного покрытия. Чем больше жесткость, тем меньше величина трения качения. Поэтому, для того чтобы сократить расходы на топливо, необходимо как можно сильнее накачивать автомобильные колеса, делая их более жесткими. Достаточно пощупать колеса грузовика, чтобы убедиться в этом. У пассажирского автомобиля давление в колесах гораздо меньше, так как с очень жесткими колесами пассажиры будут ощущать все неровности дороги. В результате его шины деформируются больше, и соответственно увеличивается сила трения качения.

Сила, необходимая для преодоления трения качения, пропорциональна весу автомобиля и, вообще говоря, не зависит от скорости его движения. Чтобы измерить эту силу, поместите машину на горизонтальный участок дороги, поставьте рычаг переключения скорости в нейтральное положение (отсоедините колеса от двигателя) и выключите зажигание. После этого привяжите к автомобилю трос, а к нему – пружинные весы, как это изображено на рисунке 26. Прикладывая к тросу силу, постарайтесь сдвинуть машину с места и равномерно тянуть ее. Одновременно с этим ваш помощник должен смотреть на пока-

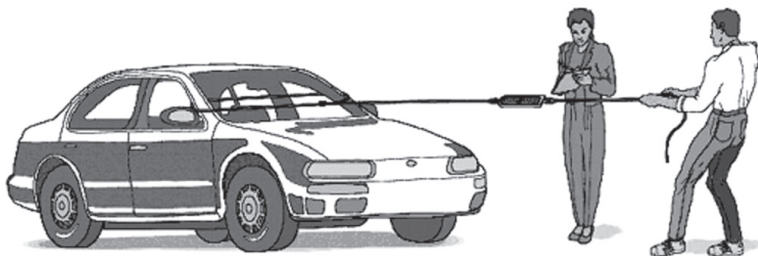


Рис.26. Измерение силы трения качения с помощью пружинных весов

зания весов и записывать их. Если нет пружинных весов, можно использовать так называемые весы для ванн комнат, которые предназначены для взвешивания человека. Такими весами можно толкать машину, используя их в качестве прокладки. Сила трения качения для автомобиля массой 1000 кг составляет в среднем около 100 Н.

Для очень дальних перевозок построены железные дороги, где железное колесо катится по железному рельсу с очень малым коэффициентом трения качения. Тормозят поезда медленно, но эксплуатация их очень выгодна.

Таблица 3

Различия коэффициентов трения качения и скольжения

Поверхности	Коэффициент трения качения	Коэффициент трения скольжения
Колесо пассажирского автомобиля на асфальте	0,015	0,8
Колесо грузовика на асфальте	0,008	0,8
Железнодорожное колесо на рельсе	0,001	0,1

Для сравнения трения качения и трения скольжения в таблице 3 приведены несколько значений соответствующих коэффициентов трения.

ВОДА В ВОЗДУХЕ: ПАР, ТУМАН И ОБЛАКА

Что такое пар и сколько его на Земле? Воздух всегда соприкасается с какими-нибудь водоемами, а в них при любой температуре найдутся такие шустрые молекулы, которые сумеют покинуть жидкость и образовать водяной пар. Одновременно с испарением возникает и обратный процесс — конденсация, т.е. возвращение молекул из пара в жидкость. Если испарение происходит в закрытом сосуде, то, очевидно, сначала концентрация пара будет расти, но потом наступит момент, когда число молекул, покидающих жидкость, окажется равным числу молекул, возвращающихся обратно. Такой пар называют насыщенным, так как его концентрация в воздухе соответствует максимально возможной при данных условиях (давлении и температуре).

Очевидно, что чем выше температура воздуха, тем интенсивнее испаряется вода и тем больше водяных паров может содержать единица его объема, а значит, давление насыщенных паров тоже растет с температурой (рис.27). Поэтому, например, концентрация водяных паров в тропических широтах в сто раз выше, чем у полюсов. Если бы весь пар, содержащийся в воздухе, внезапно вылился дождем, то вблизи эквато-

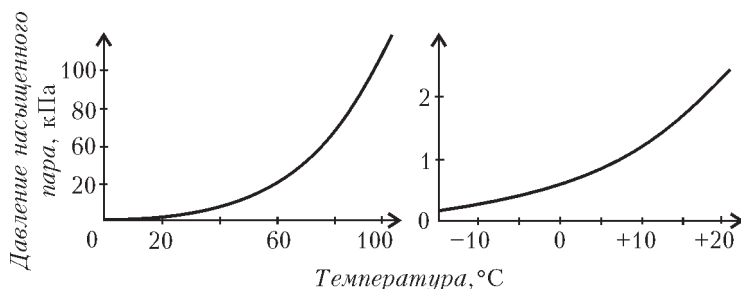


Рис.27. Зависимость давления насыщенных водяных паров от температуры: слева — при нормальном атмосферном давлении, справа — для диапазона температур воздуха средней полосы России. Область над кривой соответствует образованию тумана и облаков, а под кривой — их исчезновению