

При наступившем равновесии соблюдается баланс горизонтальных сил, растягивающих и сжимающих поверхность капли (рис.10), который позволяет вычислить величину краевого угла θ по известным значениям коэффициентов поверхностного натяжения $\sigma_{\text{тж}}$ и $\sigma_{\text{тг}}$:

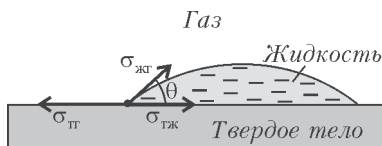


Рис.10. К вычислению краевого угла по балансу сил поверхностного натяжения

$$\sigma_{\text{тг}} = \sigma_{\text{тж}} + \sigma_{\text{жг}} \cos \theta .$$

Пайка со знанием дела. Пайка возможна только в том случае, когда припой смачивает соединяемые детали. Это происходит, если силы притяжения между атомами припоя и металла больше, чем между атомами внутри самого припоя. Если капля припоя не смачивает поверхность, то она не способна затекать в узкие зазоры между соединяемыми материалами. При наличии загрязнений соединяемых поверхностей адгезия припоя ухудшается и возможно образование несмачиваемых зон, что снижает качество пайки. Для устранения пленки окислов с поверхностей металлов и уменьшения сил поверхностного натяжения расплавленного припоя на границе «металл – припой» служат специальные материалы – флюсы. При электрическом монтаже наиболее широко применяются флюсы на основе канифоли.

Флотация: силы поверхностного натяжения за работой.

Большую роль играют силы поверхностного натяжения во флотации – широко распространенном способе обогащения разнообразных руд. Метод флотации основан на использовании различной смачиваемости водой минералов, содержащихся в руде. Для этого изготавливают пульпу – смесь измельченной руды и воды. В пульпу добавляют специальное химическое соединение, которое, взаимодействуя с искомым минералом, делает его поверхность лиофобной по отношению к воде (гидрофобной). После этого через пульпу начинают пропускать пузырьки воздуха. Так как вода не смачивает минерал, подлежащий изъятию из руды, то он выталкивается из жидкости, прилипает к пузырькам пропускаемого через пульпу воздуха и всплывает на поверхность, откуда и удаляется вместе с пеной.

Смачиваемость зависит от микроструктуры поверхности: эффект лотоса. Лотос (рис.11) – одно из прекраснейших водных растений на нашей планете. Его цветки не только изумительно красивы, но и чисты даже тогда, когда вода вокруг



Рис.11. Лотос орехоносный, или индийский (*Nelumbo nucifera*)

мутная и грязная. Листья и цветки не смачиваются водой, поэтому капли воды скатываются с них, как шарики ртути, смывая с них всю грязь. Даже каплям клея и меда не удастся удержаться на поверхности листьев лотоса. Кстати, такими же уникальными свойствами обладают листья не только лотоса, но и многих других растений, в частности обыкновенной капусты.

Оказывается, вся поверхность листьев лотоса густо покрыта микропупырышками высотой около 10 мкм, а сами пупырышки, в свою очередь, покрыты микроворсинками еще меньшего размера (рис.12). Исследования показали, что все эти микропупырышки и ворсинки сделаны

из воска. Известно, что воск действительно плохо смачивается водой, но только наличие воска на поверхности листьев лотоса не может объяснить то, что соответствующий краевой угол составляет более 160° . Для листьев магнолии, например, которые тоже покрыты воском, краевой угол равен лишь 54° . Следовательно,

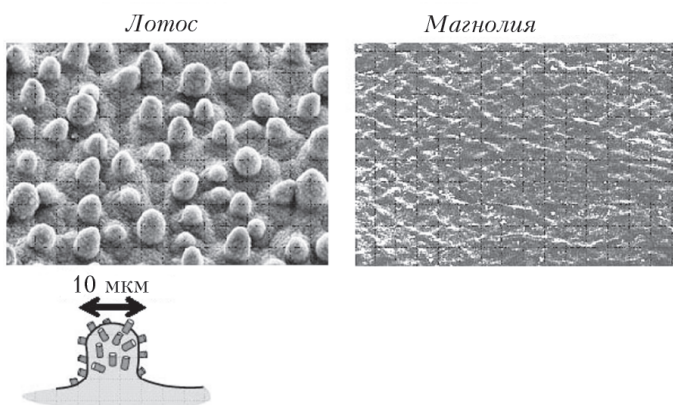


Рис.12. Микрофотографии поверхности листьев лотоса и магнолии. Внизу слева схематически показан один микропупырышек

именно пупырчатая структура поверхности листьев лотоса значительно уменьшает их смачиваемость, в три раза увеличивая соответствующий краевой угол. И вот почему.

Капля воды, попав на поверхность листа лотоса, похожую на массажную щетку, не проникает между микропупырышками, так как этому мешает высокое поверхностное натяжение жидкости. Ведь для того чтобы проникнуть между микропупырышками, капле надо увеличить свою поверхность, а это энергетически невыгодно. Поэтому капля «парит на пуантах», между которыми находятся пузырьки воздуха, что значительно уменьшает силы адгезии между каплей и поверхностью листа лотоса. Это значит, что капле становится невыгодно растекаться и смачивать «колючую» поверхность листа лотоса, и она сворачивается в шарик, демонстрируя очень высокий краевой угол, как это изображено на рисунке 13.

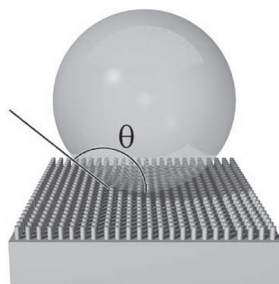


Рис. 13. Капля воды на «массажной микрощетке»

Поверхность, аналогичная массажной микрощетке, уменьшает адгезию не только капель воды, но и любых частичек размером более 10 мкм, так как они касаются такой поверхности лишь в нескольких точках. Поэтому частички грязи, оказавшиеся на поверхности лотоса, либо сами сваливаются с него, либо увлекаются скатывающимися каплями воды, адгезия к которым у них гораздо больше, чем к колючей поверхности листа. Такое самоочищение лотоса от частиц грязи называют эффектом лотоса. Похожим образом устроена поверхность крыльев бабочек и многих других насекомых, для которых защита от избыточной воды жизненно необходима: намокнув, они потеряли бы способность летать.

Выведав у природы ее секреты, ученые смогли создать искусственные самоочищающиеся покрытия. Эффект лотоса используется в промышленности для создания водоотталкивающих самоочищающихся покрытий и красок. Разрабатывается самоочищающееся ветровое стекло, внешняя поверхность которого покрыта микроворсинками – на таком стекле «дворникам» делать нечего. Совсем скоро появятся постоянно чистые диски для колес автомобилей, самоочищающиеся с использованием эффекта лотоса, а уже сейчас можно покрасить снаружи дом краской, к которой грязь не прилипает. У таких технологий большое будущее.

ТРЕНИЕ: ДРУГ ИЛИ ВРАГ?

С трением мы сталкиваемся на каждом шагу, но без трения мы не сделали бы и шага. Невозможно представить себе мир без сил трения. В отсутствие трения многие кратковременные движения продолжались бы бесконечно. Земля подвергалась бы непрерывным землетрясениям, так как тектонические плиты постоянно сталкивались бы между собой. Все ледники сразу же скатились бы с гор, а по поверхности земли носилась бы пыль от прошлогоднего ветра. Как хорошо, что все-таки есть на свете сила трения! С другой стороны, трение между деталями машин приводит к их износу и дополнительным расходам. Приблизительные оценки показывают, что научные исследования в трибологии – науке о трении – могли бы сберечь около от 2 до 10% национального валового продукта.

Классический закон трения. Два самых главных изобретения человека – колесо и добывание огня – связаны с силой трения. Изобретение колеса позволило значительно уменьшить силу, препятствующую движению, а добывание огня поставило силу трения на службу человеку. Однако до сих пор ученые далеки от полного понимания физических основ силы трения. И вовсе не оттого, что людей с некоторых пор перестало интересоваться это явление.

Первая формулировка законов трения принадлежит великому Леонардо да Винчи (1519 г.), который утверждал, что сила трения, возникающая при контакте тела с поверхностью другого тела, пропорциональна силе прижатия, направлена против направления движения и не зависит от площади контакта. Этот закон был заново открыт через 180 лет Г.Амонтоном, а затем уточнен в работах Ш.Кулона (1781 г.). До сих пор формула

$$F_{\text{тр}} = \mu N ,$$

где $F_{\text{тр}}$ – сила трения, N – составляющая силы прижатия, нормальная к поверхности контакта, а μ – коэффициент трения, полностью определяющий силу трения для любой пары контактирующих материалов, является единственной формулой, выражающей закон трения Амонтона – Кулона, которую можно найти в учебниках по физике. В течение двух столетий этот эксперимен-

тально доказанный закон никто не смог опровергнуть, и до сих пор он звучит так, как 200 лет назад:

1) Сила трения прямо пропорциональна нормальной составляющей силы, сжимающей поверхности скользящих тел, и всегда действует в направлении, противоположном направлению движения.

2) Сила трения не зависит от величины поверхности соприкосновения.

3) Сила трения не зависит от скорости скольжения.

4) Сила трения покоя всегда больше силы трения скольжения.

5) Силы трения зависят только от двух материалов, которые скользят друг по другу.

Потираем руки и проверяем основной закон трения. Сила трения – диссипативная сила. Это означает, что вся работа, расходуемая на ее преодоление, переходит в тепло. Значения коэффициента трения, приводимые в инженерных справочниках (см. таблицу 1), позволяют оценивать этот нагрев в проектируемых приборах и устройствах. Ну, а мы попробуем найти количество теплоты, выделяющееся, когда мы, разогреваясь, потираем руки.

Допустим, что мы сжимаем ладони с силой 0,5 Н, а коэффициент трения кожи об кожу составляет 0,5. Тогда сила трения, которую мы преодолеваем при скольжении одной ладони по поверхности другой, будет равна 0,25 Н. Если считать, что, разогреваясь, мы за одну секунду совершаем четыре движения ладоней и каждое из них по 0,1 м, то мощность, расходуемая на преодоление силы трения, составляет 0,1 Вт. За 10 секунд такого разогрева в области контакта ладоней выделится 1 Дж тепла. Пусть все это тепло идет на разогрев участка поверхности кожи площадью $0,01 \text{ м}^2$ и толщиной 0,001 м, который имеет массу около 10^{-5} кг и удельную теплоемкость, близкую к теплоемкости воды, т.е. $4,2 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. Значит, наши действия приведут к нагреву этого участка на 25 градусов. Видно, что оценка нагрева получилась явно завышенной. Большая часть тепла от разогрева, конечно, уходит в ткани, расположенные под кожей, и разносится по телу с кровотоком, но и оставшейся части тепловой энергии оказывается достаточно, чтобы поднять температуру кожи на несколько градусов.

Что такое тормозной путь? Две машины столкнулись на перекрестке. Повреждения небольшие, так как каждый успел почти полностью затормозить машину перед аварией. Поэтому и виноватым себя считать никто не хочет. Приехавший инспектор

Таблица 1

Коэффициенты трения для различных пар материалов

Коэффициент трения покоя	Коэффициент трения скольжения	Гладкие обезжиренные поверхности материалов при нормальных условиях	
14		Резина	Твердые тела
	0,5–0,8	Резина	Сухой асфальт
	0,2–0,7	Резина	Мокрый асфальт
1	1	Мягкая сталь	Свинец
1,1	0,2	Чугун	Чугун
1,0	0,3	Медь	Чугун
0,9	0,4	Стекло	Стекло
0,8	0,6	Стекло	Никель
0,8	0,4	Твердая сталь	Твердая сталь
0,7	0,6	Мягкая сталь	Мягкая сталь
0,6	0,5	Алюминий	Мягкая сталь
0,6	0,5	Кожа	Дуб (вдоль волокна)
0,5	0,4	Медь	Мягкая сталь
0,5	0,4	Мягкая сталь	Латунь
0,5–0,3	0,3–0,2	Дерево	Дерево
0,1	0,05	Лыжи со смазкой	Снег
0,1–0,5	0,02–0,1	Лед	Лед
0,04	0,04	Тефлон	Тефлон
0,04	0,04	Тефлон	Сталь
0,01	0,01	Суставы человека	Суставы человека

решил, что виноват тот, у кого длина тормозного пути – черного следа от колес – больше (рис.14). Почему?

Пусть машина выезжала на перекресток со скоростью v и ее водитель, увидев другую машину, стал тормозить, оставив на дороге след длиной L . Если считать, что к моменту столкновения вся кинетическая энергия автомобиля перешла в работу по преодолению силы трения (в тепло), то

$$\frac{mv^2}{2} = \mu mgL,$$

где m – масса автомобиля, а g – ускорение свободного падения.



Рис.14. Длина черного следа, оставленного колесами машины после торможения, помогает оценить скорость автомобиля

Отсюда следует, что длина тормозного пути пропорциональна квадрату скорости автомобиля. Значит, тот автомобиль, который подъезжал к перекрестку с большей скоростью, имеет и большую длину тормозного пути. Например, для $\mu = 0,7$ длина тормозного пути в 30 м соответствует скорости движения 73 км/ч, что на 13 км/ч больше разрешенной скорости движения по улицам города.

Почему все шины черные? Все изготовители шин используют один и тот же процесс – вулканизацию жидкой резины, при котором одной из добавок служит угольная пудра. В результате длинные молекулы жидкой резины сшиваются между собой, что превращает ее в эластичный и прочный материал. Так как частички угля черные и их относительно много (около 25% по массе), то и резина становится черной. Чем больше добавлять при вулканизации угольной пудры, состоящей практически из одного углерода, тем более жесткой, прочной и менее прилипчивой будет резина.

Как нажимать на газ и на тормоз? Некоторые водители, увидев, что на светофоре зажегся зеленый свет, вдавливают педаль газа до самого пола, пытаясь как можно быстрее набрать максимальную скорость. Свидетели такого старта слышат свист проскальзывающих относительно дороги шин. Со стороны это выглядит действительно очень впечатляюще. Но как на самом деле? Неужели для того чтобы машина приобрела наибольшее

ускорение, надо заставлять колеса скользить по дорожному покрытию? Конечно, нет.

Известно, что движущей силой автомобиля служит сила трения его колес о дорожное покрытие. Если резко нажать на педаль газа, вызвав проскальзывание шин относительно асфальта, то максимальное ускорение

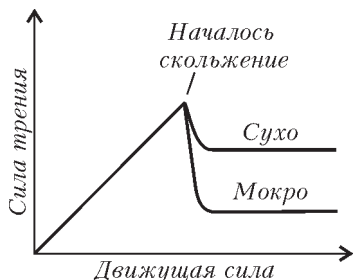


Рис.15. Зависимость силы трения, действующей на тело, от силы, которая может привести или приводит к движению тела для сухого и мокрого дорожного покрытия

будет пропорционально силе трения скольжения, которая всегда меньше максимальной силы трения покоя (рис.15). Поэтому быстрее ускоряется не тот, кто сжигает резину покрышек, а тот, кто использует силу трения покоя (т.е. не допускает скольжения) в диапазоне, где она превышает силу трения скольжения.

Резкое торможение, как и ускорение, может привести к скольжению колес по дорожному покрытию, а значит, к уменьшению силы, тормозящей авто-

мобиль, — ведь тормозящей силой является тоже сила трения. Поэтому, нажав очень резко на педаль газа и допустив проскальзывание, мы увеличиваем тормозной путь. Чтобы минимизировать тормозной путь, в современных автомобилях устанавливают систему ABS (Antilock Brake System), которая, препятствуя скольжению колес по дорожному покрытию, трансформирует резкое нажатие на тормоз в последовательность нескольких торможений. Эффективность ABS-торможения особенно высока на мокрых дорогах, когда максимальная сила трения покоя может в несколько раз превышать силу трения скольжения.

Для чего нужен рисунок на шинах автомобиля? Если машина въезжает в лужу, а вода не успевает выскочить из-под колеса, то сцепление с дорогой теряется, и колесо может вращаться вокруг оси, не испытывая трения. В этом случае машина становится неуправляемой. Вот почему на покрышках автомобильных шин находятся канавки, помогающие воде выбираться из-под колеса, что помогает резине шин даже в лужах быстро находить контакт с покрытием дороги (рис.16). Зимой большинство водителей обувают свои машины в зимнюю резину. Если ездить на летних покрышках зимой, то узкие канавки быстро забьются снегом, а он, превратившись в лед, сделает из автомо-



Рис.16. Покрышки автомобильных шин, предназначенные для летних дорог (слева), зимних дорог (в центре) и бездорожья (справа)

бия прекрасное средство для неуправляемого скольжения по дорогам. Поэтому покрышки, приспособленные для езды по заснеженным и обледенелым дорогам, имеют широкие канавки и гораздо большую поверхность контакта с дорожным покрытием. Если же предстоит ехать по бездорожью, то покрышки должны быть глубоко рифлеными, так как грязь, имеющая большую вязкость, просто не пролезет через узкие канавки, когда будет двигаться под весом наезжающего колеса.

Гонки «Формулы 1» – война шин. Каждый пилот гоночного болида хочет иметь хорошее сцепление с дорогой, чтобы обеспечить быстрый старт. Но это значит, что шины его автомобиля должны хорошо прилипать к дорожному покрытию. Но такая шина всегда будет оставлять на дороге след из частичек, прилипших навсегда к дорожному покрытию. Другими словами, износ шин с высоким сцеплением тоже высок. Поэтому на гонках «Формулы 1» средний ресурс шины всего около 200 км, в то время как у обычных шин он может составлять несколько десятков тысяч километров.

Известно, что автомобильные гонки проходят на «лысой» резине или на шинах с несколькими очень неглубокими канавками (рис.17). Канавки в шинах гоночных машин не нужны, так как они увеличивают сцепление с дорогой только тогда, когда она мокрая. А при мокрой дороге гонки отменяются.

Для производства шин гоночных автомобилей используется специальная липкая резина. Поэтому сила трения этих шин на сухой дороге растет с увеличением площади контакта, вступая, таким образом, в противоречие с классическим законом, справедливым для трения твердых и неэластичных поверхностей. Чтобы обеспечить максимальную силу трения, шины колес

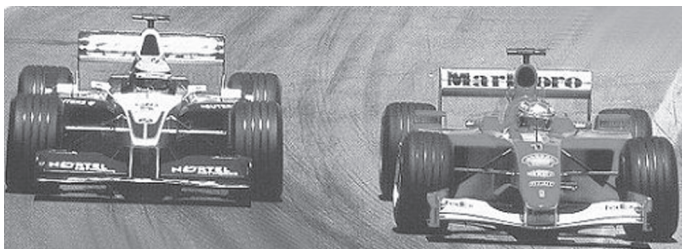


Рис.17. Шины гоночных болидов «Формулы-1» – очень широкие и совсем «лысые»

гоночных автомобилей делают очень широкими (до 0,38 м), что также позволяет лучше рассеивать тепло, выделяющееся при трении о дорожное покрытие.

Чистая резина прилипает к дороге лучше, чем грязная. Поэтому перед самым стартом покрышки с помощью специальных устройств и процедур нагревают до 80°C , очищая ее поверхность и обеспечивая хорошее прилипание к дорожному покрытию. Кстати, шины гоночных автомобилей иногда надувают чистым азотом, так как влага, содержащаяся в обычном воздухе, при нагревании шин испаряется и увеличивает давление в колесах, что создает дополнительные трудности в управлении.

О чем поют колеса? Шум, издаваемый колесами автомобилей, – одна из основных проблем больших городов. Огромные средства тратятся ежегодно на борьбу с этим шумом, так как стоимость одного километра звукопоглощающего барьера, устанавливаемого вдоль шоссе, близка к одному миллиону долларов. Есть несколько теорий возникновения этого шума. Одна из них считает, что шум возникает из-за колебаний деформированных участков внешней части покрышки. Другая теория связывает появление шума с отлипанием резины от дороги. Ну, а самая романтическая гипотеза объясняет шум тем, что воздух двигается по канавкам автомобильных покрышек, как по трубам органа, и поэтому поет.

Классики не всегда правы. Уже в XIX веке стало ясно, что закон Амонтона – Кулона не всегда дает правильное описание силы трения, а коэффициенты трения отнюдь не являются универсальными характеристиками. Прежде всего, было отмечено, что коэффициенты трения зависят не только от контактирующих материалов, но и от того, насколько гладко обработаны соприкасающиеся поверхности. Выяснилось, например, что сила