

# С ним — трудно, без него — вдвойне

Доктор технических наук, профессор  
**Н.К.Мышкин,**  
доктор технических наук  
**М.И.Петроковец**

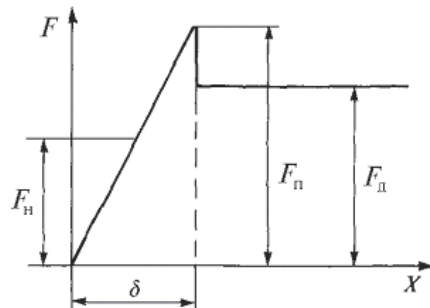
Это — трение. Человек сталкивался с ним, еще когда жил на деревьях. Первую теорию трения создал Леонардо да Винчи, а современное определение трибологии дал специальный комитет при Министерстве торговли и промышленности Великобритании (Department of Trade and Industry Committee on Tribology) только в 1966 году. Потому что трибология продолжала развиваться, развивается она и сейчас. Это — наука о трении, от греческих «трибос» — тереть и «логос» — слово. Иногда ее трактуют шире — и как науку о взаимодействиях тел при контакте, о трении и износе, и как технологию управления трением и износом.

Древний человек извлекал огонь, используя трение кусков дерева, то есть превращение при трении механической энергии в тепло. Позже, когда человек стал использовать камень, трут и кресало — трение и износ: искры, которые летели при ударе, были горящими (окисляющимися) мелкими кусочками железа. Как повлияло на человека овладение огнем, известно. В цивилизациях древности инженерные решения проблем трения и смазки привели к появлению полоза, лыжи и колеса. Без решения проблем трения было бы невозможно строительство, транспорт, мореплавание. Цивилизация была бы иной — если бы вообще была.

## Основные законы трения

Пусть одно тело находится в контакте с другим. Повседневный опыт показывает, что для перемещения одного тела по другому надо приложить силу. Когда эта сила возрастает от нуля до некоторой определенной величины, в зоне контакта возникают очень малые перемещения, но сами тела еще не скользят друг по другу — до тех пор, пока касательная сила не достигнет предельной величины, которая называется силой трения покоя  $F_n$  (рис. 1). При этом перемещение в контакте достигает значения  $\delta$ , и затем начинается скольжение. Простой аналогией такого явления может быть движение щетки, которая не сразу начинает скользить по одежде, а после некоторого смещения. Значит, между двумя контактирующими и неподвижными друг относительно друга телами возникает сила, которая препятствует движению одного тела относительно другого, — сила трения покоя.

Значение этого закона очень велико, несмотря на простоту формулировки. Мир без трения покоя был бы странным и удивительным, если бы вообще мог существовать. Люди не могли бы ходить в обычной обуви без



1  
Сила трения

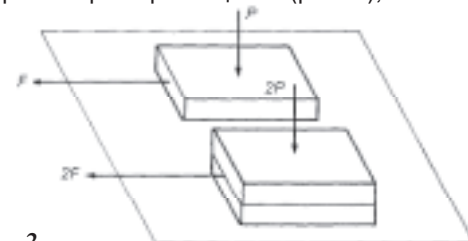
шипов. Книга, которую мы положили на стол, постепенно соскользнула бы на пол и забилась в угол комнаты, перемещаясь по полу как по наклонной плоскости. Колеса любого транспортного средства буксовали бы, и движение его стало бы невозможным. Это была бы жизнь в условиях всеобщего и абсолютного гололеда. Как пел В. Высоцкий:

Чем-то скользким одета планета,  
Гололед на Земле, гололед.  
Целый год напролет гололед  
Будто нет ни весны, ни лета.

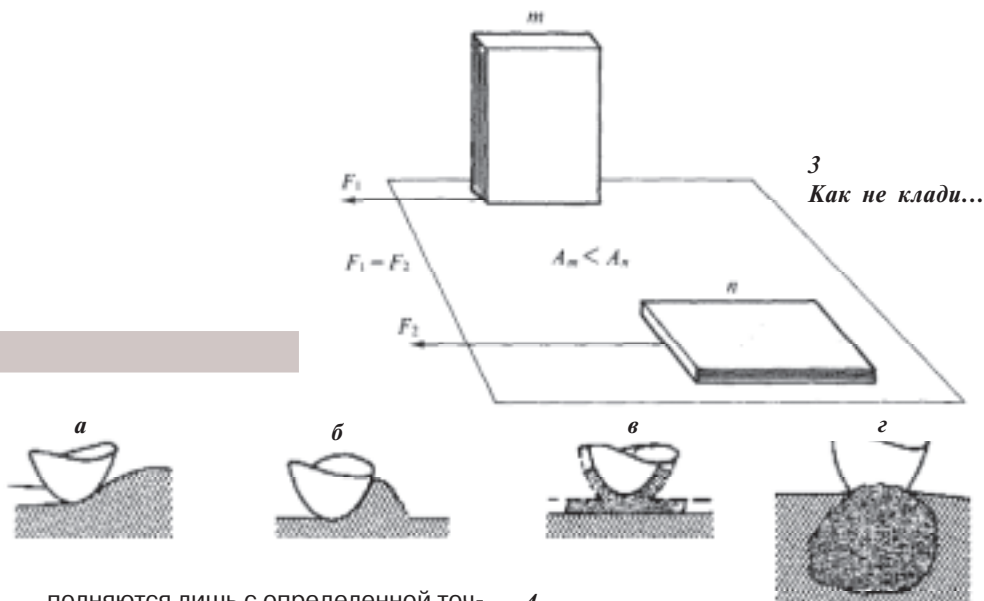
Согласно рис. 1, после того как тело сдвинулось с места, сопротивление перемещению уменьшается и далее сохраняется примерно постоянным, если условия движения не изменяют-

ся. Это сопротивление движению называется трением движения, а сила сопротивления — силой трения движения. Отношение силы трения (покоя или движения) к весу называют коэффициентом трения (соответственно покоя или движения). Леонардо да Винчи считал, что для гладких поверхностей коэффициент трения постоянен и равен 0,25, и эта точка зрения продержалась в науке два века. Г.Амонтон в XVII веке полагал, что коэффициент трения равен 1/3 для железа, кожи, свинца и дерева. На самом же деле коэффициент трения может изменяться от 0,001 в подшипниках качения (при малых нагрузках) до нескольких десятков для тщательно очищенных одноименных металлов (в вакууме). И качение, и контактирование в вакууме — это особые ситуации, но и в обычных условиях при трении на воздухе коэффициент трения изменяется в десять раз — от 0,1 до 1. Как правило, стремятся сделать коэффициент трения как можно меньше, но в ряде случаев (тормоза, муфты) он должен быть максимально возможным. Во всех случаях важно, чтобы коэффициент трения был стабильным.

Коэффициент трения зависит от того, какие материалы контактируют, и не зависит от нагрузки — это утверждение называют законом Амонтона. Если на плоскости лежит какое-либо тело (скажем, книга), вес которого  $P$ , и сила, необходимая для того, чтобы сдвинуть это тело с места, равна  $F$ , то сдвинуть с места стопку из  $n$  книг (на рисунке  $n = 2$ ) можно, лишь приложив в  $n$  раз большее тангенциальное усилие (в данном случае  $2F$ ), — рис. 2. Это соотношение, как и постоянство силы трения при перемещении (рис. 1), вы-



2  
Закон Амонтона



полняются лишь с определенной точностью. Уже Амонтон писал, что сила трения находится в сложной зависимости от нормального давления и скорости скольжения. Однако во многих случаях эта точность достаточна.

Другой закон, касающийся трения, сформулировал Леонардо да Винчи. Он установил, что сила трения не зависит от формы и размера номинальной площади контакта — площади, по которой соприкасались бы тела, если бы были идеально гладкими. Например, если мы используем одно и то же тело, то усилие для перемещения тела по плоскости не зависит от того, по какой из граней происходит трение (рис. 3). Эта странная ситуация не привлекала внимания до тех пор, пока результаты не были подтверждены Амонтоном. В дальнейшем выяснилось, что из-за шероховатости реальных поверхностей твердые тела контактируют не всей номинальной поверхностью, а отдельными пятнами. Общая площадь таких пятен (фактическая площадь контакта) мала и растет линейно с увеличением нагрузки. Сила трения пропорциональна фактической площади контакта, а значит — нагрузке. Располагая образцом различными гранями, мы сохраняем величину фактического контакта, которая зависит только от нагрузки, поэтому сила трения не зависит от площади номинального контакта.

Спустя совсем немного времени, в конце VIII века, Ш.Кулон (тот самый, которого «закон Кулона» и школьный фольклор «сила по Кулону — ку на ку») пришел к более общей зависимости. Он установил, что сила трения состоит из двух компонент — одной, пропорциональной нагрузке, и другой, постоянной. Эта вторая компонента зависит от слипания тел, адгезии, и становится заметной, если поверхности очень гладкие. На практике легко

#### 4 Разрушение при трении

убедиться в существовании такого слипания, взяв два куска стекла или полированного металла. Адгезия является результатом действия сил межмолекулярного притяжения.

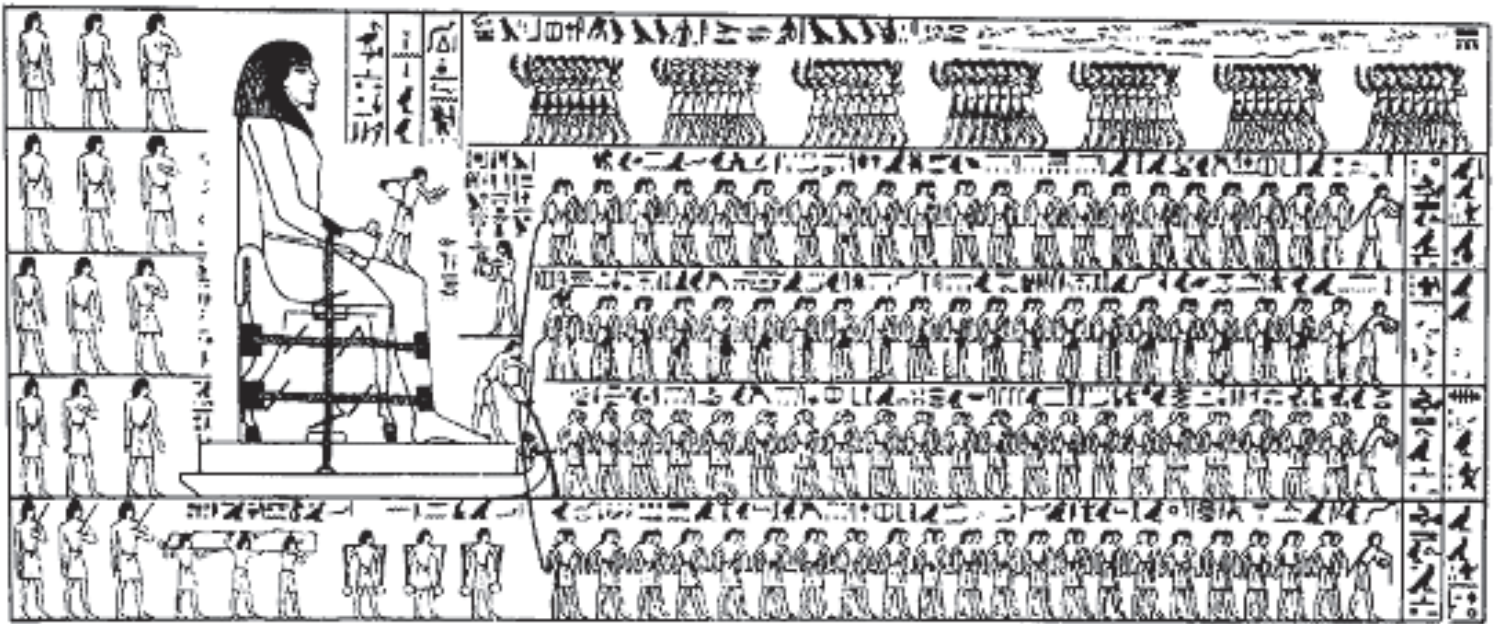
Закон Кулона лег в основу современных теорий трения, разработанных Ф.Боуденом и Д.Тейбором (Англия) и И.В.Крагельским (Россия). Обе теории базируются на представлении о двойственной природе трения, то есть предполагается, что трение имеет две составляющие: механическую (деформационную) и молекулярную (адгезионную), и они просто складываются. Однако компоненты трения действуют на разных масштабах и оцениваются при различных допущениях. Если деформационная составляющая определяется для областей микронных размеров, областей фактического контакта, при допущении о сплошной структуре материала, то адгезионная составляющая — результат действия сил межмолекулярного притяжения на расстояниях атомного масштаба. Эти составляющие не независимы, изменение одной из них сказывается на поведении другой. Создание общей теории трения, в которой деформационная и молекулярная составляющие окажутся не постулатами, а приближенными результатами, — актуальная проблема современной трибологии.

### Изнашивание и износ

Это не синонимы: первое — процесс, второе — неизбежный и, как правило, неприятный результат. Удаление материала с поверхности контактирующих тел в результате их трения имеет далеко идущие последствия, оно —

главная причина выхода из строя любых орудий труда, от лезвия бритвы до ножовки, любых машин и механизмов, любой одежды и обуви. Только потери металла от износа составляют миллионы тонн в год, но дело часто не в величине износа, а в том, что даже истирание тонкого поверхностного слоя детали может привести к полной потере работоспособности. Кроме того, износ важен для экологии, например, густой шлейф дыма из выхлопных труб автомобилей — это, как правило, результат износа поршневых колец двигателя.

Изнашивание зависит от нагрузки, скорости скольжения, температуры, свойств трущихся материалов, смазки и состава окружающей среды. У износа есть три стадии: взаимодействие поверхностей, изменения в поверхностных слоях и повреждение поверхностей. Взаимодействие поверхностей можно разделить на механическое и молекулярное (рис. 4). Механическое — это внедрение и зацепление неровностей. При перемещении происходит упругое (обратимое) и пластическое (необратимое) отеснение материала внедрившимися неровностями (рис. 4а). Зацепление неровностей приводит к их взаимному деформированию, менее прочная неровность может срезаться (рис. 4б). Молекулярное взаимодействие проявляется в адгезии пленок, покрывающих контактирующие поверхности (рис. 4в), а если адгезия велика, то разрушение сопровождается вырыванием кусков материала (рис. 4г). Изменение механизма изнашивания меняет его скорость в тысячи раз, и, чтобы эта скорость была как можно ниже, выгодно по возможности уменьшить толщину слоя материала, в котором происходят деформация и адгезионное сцепление, или вообще локализовать эти процессы в пленке на поверхности, применив смазочный материал. Существуют, однако, и ситуации, когда скорость изнашивания должна быть как можно больше, например при шлифовании и полировании.



## Смазка

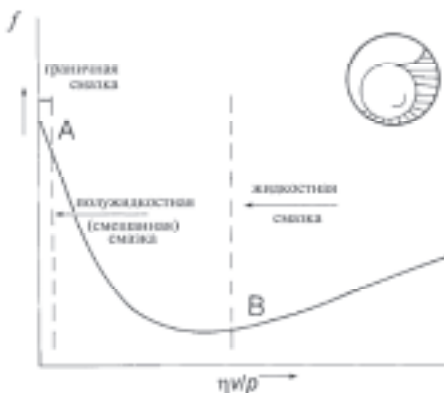
Почти всегда самый простой способ уменьшить трение и износ — применение смазки, помещение между трущимися телами пленки смазочного материала с малым сопротивлением перемещению. Сначала такими материалами были растительные и животные жиры, сырая нефть, деготь, графит, а затем, с развитием химии, продукты нефтехимического синтеза, органические и неорганические масла, полимеры и сульфиды некоторых металлов.

Смазочные материалы используются человечеством с древнейших времен. Люди очень быстро поняли буквальный смысл поговорки «не подмажешь — не поедешь». Свидетельство тому — колесницы шумеров (XXIV–XXI века до н. э.), которые вряд ли были бы грозной боевой техникой, имея они несмазанные колеса. Пример использования смазки при транспортировке громадных статуй оставили нам древние египтяне (рис. 5). Обратите внимание на человека, стоящего на переднем краю салазков и поливающего какой-то жидкостью поверхность скольжения. Это, по-видимому, один из первых профессиональных трибологов.

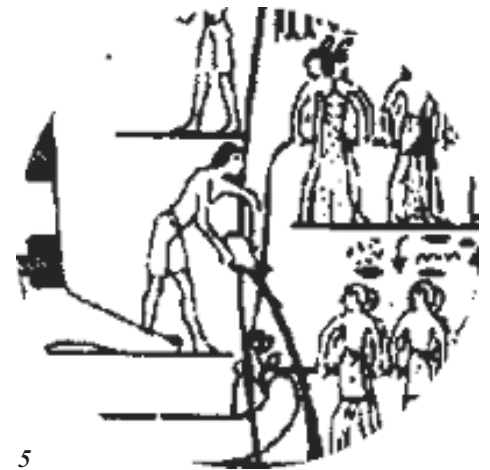
Смазка выполняет много функций — в первую очередь разделяет реальные шероховатые поверхности и не дает им деформироваться и слипаться. Смазка трущихся поверхностей изменяет механизм трения, а насколько существенно — зависит от вязкости и толщины слоя смазки. Посмотрим, как функционирует смазанный подшипник

скольжения (рис. 6). Пусть смазка обильная, то есть она полностью разделяет сопряженные поверхности и препятствует их прямому контакту. При вращении вал вовлекает смазку в зазор, ближайший к поверхности вала тонкий слой прилипает к валу и движется вместе с ним, а остальные перемещаются за счет внутреннего трения. Смазка втягивается в самое узкое место зазора и раздвигает вал и подшипник. Это явление называется эффектом масляного клина, а соответствующий режим трения — гидродинамическим; основы гидродинамической теории трения были заложены Н.Петровым (Россия) в конце XIX века. Коэффициент трения при таком режиме очень мал — до 0,001.

Вернемся к рис. 6, который называется диаграммой трения или кривой Герси–Штрибека. Происхождение минимума в точке В и правой пологой ветви фактически следует из приведенного выше описания механизма смазки и нескольких дополнитель-



6 Смазки и поехали



5 Трение в Древнем Египте

ных пояснений. Справа от точки В коэффициент трения может возрастать с ростом вязкости (увеличиваются потери на внутреннее трение), увеличением скорости вала (увеличиваются перепад давления и реакция смазки на вал, вызывая увеличение зазора), понижением нагрузки на вал (опять же увеличение зазора) или за счет совместного изменения этих параметров. В этой области сопряженные поверхности полностью разделены смазкой, и износ практически не наблюдается.

Более крутая левая ветвь описывает трение в условиях, при которых толщина смазочной пленки уменьшается за счет соответствующего изменения рассматриваемых параметров, например увеличения нагрузки. Вблизи точки В, когда толщина смазки составляет 0,1–10 мкм, но тем не менее еще обеспечивает разделение трущихся поверхностей сплошной пленкой, уже нельзя пренебрегать



деформацией контактирующих тел. Из-за деформации площадь контакта возрастает и происходит перераспределение нагрузки, что в совокупности с возросшей вязкостью способствует повышению нагрузочной способности узла трения. Такой режим смазки называется упругогидродинамическим.

Если толщину пленки сделать еще меньше, она не сможет разделять контактирующие поверхности полностью. Это режим смешанной или полужидкостной смазки, когда масляный клин появляется на одних участках контакта, а на других может происходить либо контакт поверхностей, либо они оказываются разделены такой тонкой пленкой ( $< 0,1$  мкм), что ее поведение становится мало похожим на поведение жидкости. Такой режим называют граничной смазкой, и в этой ситуации возрастает роль физико-химических и химических процессов.

## Трибология и химия

Трибохимия — область химии, изучающая химические и физико-химические изменения твердых поверхностей в процессе трения или удара, то есть инициированные механической энергией. Один из древнейших примеров такого инициирования химической реакции — добывание огня при трении и ударе.

При взаимодействии поверхности с окружающей средой (в том числе и со смазкой) происходит адсорбция. В процессе химической адсорбции на поверхности формируется монослой, который можно удалить только при высокой температуре. Кроме того, происходят химические реакции поверхности со средой, например окисление. Результат таких реакций — образование на поверхности новой фазы.

Воздействие некоторых веществ на поверхность металлов или неметаллов может привести к изменению механических свойств поверхностных слоев. Впервые это явление наблюдал российский химик П.А.Ребиндер.

При этом на поверхности формируется тонкий пластичный слой (толщиной около  $0,1$  мкм) с низким сопротивлением сдвигу, что облегчает разрыв адгезионных соединений. Этот эффект называют эффектом Ребиндера, а соответствующие вещества вводят в смазки.

Результатом химического или электрохимического взаимодействия трущихся поверхностей может быть их разрушение, называемое коррозионным изнашиванием. Иногда термин «коррозионное изнашивание» применяют к интенсивному изнашиванию в агрессивной среде, а умеренный износ в нормальной атмосфере называют окислительным изнашиванием. В этом случае разрушается только поверхностный слой и образуется стабильная оксидная пленка.

В результате химических реакций в зоне трения появляются полимеры трения — продукты полимеризации смазки. Они возникают при взаимодействии смазки со средой и материалами трущихся деталей. Полимеры трения улучшают условия работы узла трения, снижают износ и силу трения.

Существует даже оригинальная гипотеза, согласно которой зарождение жизни на Земле обязано трибохимическим реакциям. Утверждается, что некоторые реакции, при которых образуется белок аланин, могли протекать при воздействии ультразвука или ударных волн на реакционную смесь.

Важную роль играют трибохимические реакции и при граничной смазке. Сам термин «граничная смазка» был введен в научный обиход в начале прошлого века У.Харди (Англия), а основные результаты в этой области трибологии были получены Б.В.Дерягиным, А.С.Ахматовым, Г.В.Виноградовым и Р.М.Матвеевским. В машинах и механизмах трение чаще всего происходит именно в этом режиме, поскольку металлы обычно покрыты адсорбированной пленкой. Даже в условиях гидродинамической смазки узлы трения при пуске и остановке машин и механизмов некоторое вре-

мя работают в режиме граничной смазки. Но не все смазки способны эффективно образовывать граничный слой на поверхности трения — например, чистые минеральные масла для этого мало пригодны. Поэтому к ним добавляют вещества, молекулы которых либо полярны, имеют активные концевые группы и поэтому хорошо адсорбируются поверхностями, либо химически взаимодействуют с поверхностью. Впрочем, если адсорбированные молекулы имеют на концах одинаковые группы (например, эфиры), то они могут располагаться вдоль поверхности, формируя кристаллоподобный слой. Граничные слои могут быть образованы и из твердых смазок, например графита или дисульфида молибдена, — на поверхности образуется слой со слоисто-решетчатой структурой.

Граничные слои предотвращают непосредственный контакт неровностей и, экранируя поверхностные поля, значительно снижают адгезию. При этом они имеют низкую сдвиговую прочность и большое сопротивление сжатию. Тонкая граничная пленка, покрывающая шероховатые поверхности, повторяет их рельеф. Поэтому поверхности контактируют через смазку, но по отдельным пятнам. Малая толщина смазочного слоя не может препятствовать упругой и пластической деформации контактирующих тел, но сдвиг происходит в пленке, а не в основном материале, что и приводит к снижению трения. Еще Харди заметил, что коэффициент трения стекла по стеклу уменьшается в десять раз (с 1 до  $0,1$ ), если поверхность покрыть тонким слоем стеариновой кислоты.

При значительной пластической деформации и высокой температуре смазочная пленка может разрушаться, тогда адгезия, трение и износ увеличиваются. Неудачно подобранная смазка может вызвать даже коррозию металлов, поэтому выбор смазки зависит не только от контактирующих материалов, но и от режима эксплуатации — это уже не только наука, но и в какой-то мере искусство.

## В сердце, колене, видеке, компьютере

Трибологические проблемы возникают всегда, когда контактируют два тела. Очень часто эти проблемы оказываются сложными, а их решение — необходимым для работы устройства. Причем поскольку общий вектор развития техники направлен в сторону решения новых задач, то и трибологические проблемы постоянно обновляются. Вот несколько примеров.

Искусственный клапан для сердца — проблема низкого трения и, как вы сами понимаете, минимального износа: все продукты эрозии оказываются в крови. Протезы суставов — все то же плюс работоспособность при высоких нагрузках; в этих двух ситуациях узел трения работает в жидкой и вовсе не инертной среде, так что хи-

душным зазором). Компания IBM потеряла кучу денег и половину рынка винчестеров, когда винты залипали и не хотели стартовать. Сейчас винты работают со слоем мономолекулярной смазки — перфторэфиры — для предотвращения сцепления и трения при стартах и стопах.

Целой новой областью техники с новыми трибологическими проблемами оказалась нанотехника. Во-первых, до недавнего времени трибология имела дело с узлами трения обычных размеров, и участки контактов были намного меньше самих деталей. Но с 70-х годов XX века трибологи столкнулись с проблемами трения и износа на микроуровне, например в результате быстрого развития компьютерной техники, робототехники, медицинской техники (микрохирургия), гироскопов. Трение, смазка и износ в микросистемах реализуются на очень гладких площадках контакта, сравнимых с размерами систем, и поэтому роль адгезии и поверхностных сил в них очень велика. Пришлось искать принципиально новые решения — например, для снижения трения в системах магнитной записи используют мономолекулярные слои фторированных углеводов.

Во-вторых, для создания приборов микронных и наноразмеров используются микроэлектронные технологии, которые создавались для работы с кремнием, а он имеет высокое трение. При размерах в десятки микрон можно сделать образец методами кремниевых технологий, а потом металлическую или полимерную копию методом литья под давлением (фото 1), но при меньших размерах (фото 2) такая технология неэффективна, и приходится либо применять сверхтонкие покрытия с малым трением, либо изменять свойства поверхностного слоя деталей, например, ионным легированием.

Вызов и ответ — так устроена вся история техники. На брошенный ей вызов трибология всегда находит ответ. Но это бывает очень и очень непросто.

## Новости трения

До сих пор исследователям не удалось точно измерить трение, возникающее между деталями микроскопических моторчиков, насосов и редукторов, которые могут быть элементами крошечных медицинских имплантатов для работы, например, в организме человека. Такие устройства — микроэлектромеханические системы — зачастую содержат детали размером в несколько нанометров, поэтому точно измерить трение между этими крошечными элементами чрезвычайно трудно. А без знаний о силе трения невозможно выбрать смазку. Исследователи университета штата Огайо Б.Бхушан и Х.Уинбиглер разработали метод измерения трения между микроскопическими деталями, позволяющий увеличить точность измерений в два раза и предложили новый способ нанесения смазки на миниатюрные детали. Они нанесли смазку слоем толщиной 1 нм по всей поверхности трущихся деталей, нагревая их до 150°C, и коэффициент трения снизился вдвое. Возможно, что при этом как раз и образовались те самые полимеры, о которых говорится в статье.

Однако во многих случаях удобнее сухие смазки — например, для космических применений. И не только для них. Во Фраунгоферском институте тонких пленок и поверхностей разработано аморфное гидрокарбонатное покрытие для деталей, работающих с большой нагрузкой. Такие покрытия можно наносить в вакууме при 200°C на поршни, валы, зубчатые колеса, клапаны и другие подобные детали. Это покрытие может быть применено, например, в дизельных двигателях нового поколения. А для покрытия поверхности штампов было разработано углеродное алмазоподобное покрытие. Оно предотвращает холодное сваривание между контактирующими участками инструмента и заготовки — вечную проблему при штамповке изделий из сплавов алюминия или титана. Дополнительное преимущество — при откате от жидкой смазки детали после штамповки не надо обезжиривать — их можно сразу сваривать, красить или склеивать. Процесс становится дешевле, и не надо утилизировать растворители.

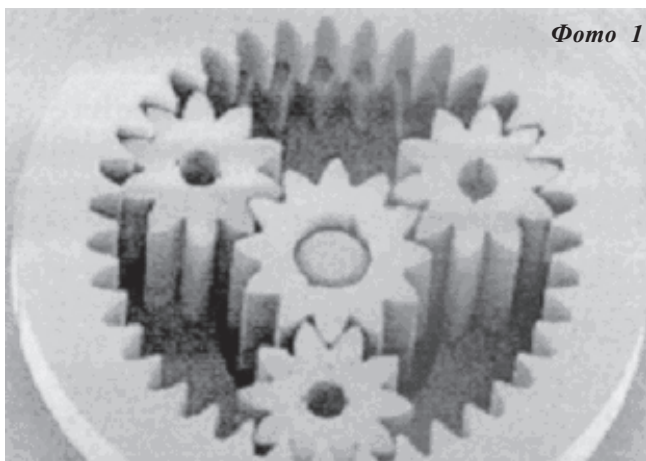


Фото 1

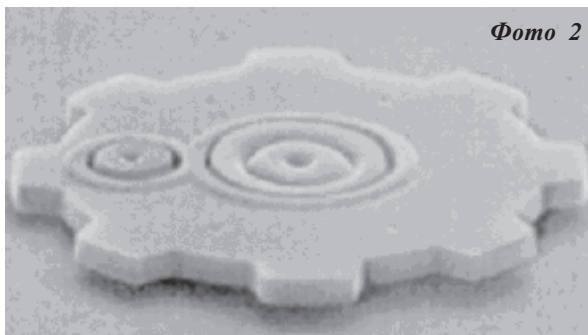


Фото 2

мические проблемы тоже возникают. Видеомагнитофон — опять проблема низкого трения и износа. Оказалось, что очень низким износом обладают пленки аморфных металлов, которыми и покрывают головки магнитофонов. Все космические применения — проблема низкого трения в условиях вакуума, когда трение металлов возрастает в десять и более раз. Главная проблема винчестера в компьютере — это проблема начала движения и остановки, когда трение играет главную роль (во время движения головка отделена от диска воз-