

ТРЕНИЕ ТВЕРДЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Т. А. Кокторова, Ленинград

ГЛАВА I. СТАТИЧЕСКОЕ ТРЕНИЕ „СУХИХ“
ПОВЕРХНОСТЕЙ

§ 1. Закон Амонтона

Впервые законы трения твердых тел были сформулированы в 1699 г. французским физиком Амонтоном¹ в следующем виде: сопротивление относительному движению твердых тел пропорционально нормальной нагрузке и не зависит от площади контакта между телами. Позднее (в 1781 г.) к аналогичным выводам пришел также Кулон².

Математически закон Амонтона (приписываемый обычно Кулону) формулируется следующим образом:

$$P = \mu F, \quad (1)$$

где P — сила трения, F — нормальная нагрузка (давление на единицу площади), μ — коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом трения.

Различают статическое трение (трение покоя) и трение кинетическое (трение движения). В первом случае в соотношении (1) под P подразумевается сила, которую нужно приложить для того, чтобы привести в движение одно тело относительно другого; соответствующий коэффициент трения мы будем обозначать в дальнейшем μ_s ; в случае кинетического трения под P подразумевается сила, нужная для того, чтобы поддерживать относительное движение трущихся тел (скольжение) с данной скоростью; коэффициент кинетического трения мы будем обозначать μ_k . Закон Амонтона (1) принято считать основным законом статического и кинетического трения как „сухих“ (несмазанных), так и смазанных поверхностей.

Многочисленные экспериментальные исследования, проведенные со времени формулировки этого закона, показали, однако, что в целом ряде случаев наблюдаются отклонения от него, а также обнаружили новые факторы, влияющие на трение твердых поверхностей.

В этой статье мы попытаемся осветить основные закономерности, которым подчиняется трение твердых тел, — закономерности в основном качественные, так как, как это ни странно, сколько-нибудь удовлетворительной теории столь распространенного в повседневной практике явления, как трение, не существует.

В I и II главах мы остановимся на рассмотрении статического и кинетического трения „сухих“ поверхностей, третью и четвертую главы посвятим разбору вопросов, связанных со статическим и кинетическим трением при наличии смазки. Мы попытаемся затем дать краткое представление о существующих теориях трения и наметить возможные пути объяснения некоторых экспериментальных закономерностей, остающихся пока не вполне понятными.

§ 2. Влияние степени чистоты трущихся поверхностей

Особую роль чистоты трущихся поверхностей при определении коэффициентов статического и кинетического трения отмечают все авторы работ по трению. Только в случае тщательной очистки поверхностей удается получать постоянные, воспроизводимые значения μ_s и μ_k ¹⁾.

Вопроса о зависимости коэффициента кинетического трения от степени чистоты трущихся поверхностей мы коснемся несколько позднее; здесь же остановимся на рассмотрении данных, относящихся к коэффициенту статического трения.

Еще в одной из первых своих работ Гарди ³ отмечает, что тщательная очистка трущихся поверхностей приводит к значительному повышению коэффициента статического трения. Объяснение этого факта не встречает особых трудностей. Всякую твердую поверхность можно рассматривать как „смазанную“ адсорбированными на ней пленками различных посторонних веществ; в большинстве случаев мы имеем, повидимому, дело с мономолекулярными пленками, образованными адсорбированными из окружающей среды молекулами кислорода, воды или каких-либо содержащихся в атмосфере примесей.

Лэнгмюр ⁴ в своей статье „Механические свойства мономолекулярных пленок“ описывает опыты, непосредственно выясняющие характер влияния мономолекулярных пленок, нанесенных на твердые поверхности, на величину коэффициента статического трения этих поверхностей. Ему удавалось получать мономолекулярные пленки жирных кислот на стекле путем перенесения их с поверхности воды на стекло; этим способом можно было также получить ряд мономолекулярных слоев, нанесенных друг на друга.

Коэффициент статического трения определялся с помощью так называемого метода „наклонения“, который заключается в том, что лежащие одна на другой пластинки отклоняют от горизонтального положения до тех пор, пока одна из них не начнет сколь-

¹⁾ Численные значения μ_s и μ_k , приводимые различными авторами, не могут поэтому быть сравниваемы друг с другом.

зить по другой. Коэффициент статического трения равняется при этом тангенсу угла, при котором начинается относительное движение поверхностей. В случае „чистых“ стеклянных поверхностей такое скольжение начиналось при углах наклона, близких к 60° . Если же на одну из поверхностей была нанесена мономолекулярная пленка жирной кислоты, то опыт приводил к разным результатам в зависимости от того, была ли нанесена пленка на скользящее тело („ползунок“) или же на поверхность, по которой происходит скольжение. В первом случае угол, отвечающий началу скольжения, уменьшался до 40° ; после весьма незначительного относительного перемещения поверхностей дальнейшее скольжение, однако, прекращалось и возобновлялось лишь при увеличении угла наклона до 60° . Если же мономолекулярная пленка находилась на поверхности, относительно которой происходит скольжение, то последнее значительно облегчалось, начинаясь при углах наклона в $6-8^\circ$ и не прекращаясь в течение довольно значительного промежутка времени.

Это различие Лэнгмюр объясняет тем, что с „ползунка“ (скользящего тела) мономолекулярная пленка в процессе опыта очень быстро стирается, изнашивание же пленки на нижней поверхности, относительно которой имеет место скольжение, весьма незначительно (ввиду малости размеров „ползунка“ по сравнению с размерами этой поверхности). Опыт показывает, что мономолекулярная пленка оказывается стертой с ползунка в результате перемещения его всего лишь на 2 мм.

Не во всех случаях снятие пленки оказывается, однако, столь легко осуществимым. Большой интерес представляют упоминаемые Лэнгмюром⁴ опыты Шефера по измерению коэффициента статического трения стеклянной сферы о стеклянную плоскость, покрытую пленкой стеариновой кислоты. Относительное движение поверхностей в этих опытах совершалось по строго определенной траектории; в случае мономолекулярной пленки кислоты возрастание коэффициента трения удалось наблюдать после 700-кратного повторения опыта. В случае же пленки стеариновой кислоты толщиной в 7 мономолекулярных слоев коэффициент трения начинал возрастать заметным образом лишь после того, как опыт был повторен 4000 раз.

Путем создания на одной из поверхностей тонкой невидимой для глаза пленки смазывающего вещества, полученной в результате нахождения „чистой“ поверхности в атмосфере насыщенного пара смазки или же в результате нанесения на какой-либо участок этой поверхности капли смазки, Гарди⁵ удавалось получать резко пониженные значения коэффициента статического трения (подробнее об этом см. в §¹⁴).

Все эти опытные факты с несомненностью свидетельствуют о том, что наличие на твердых поверхностях тонких пленок посторонних веществ приводит к понижению коэффициента статического трения поверхностей, снятие же, изнашивание этих пленок влечет за собой заметное увеличение коэффициента трения.

Возрастание коэффициента статического трения, наблюдающееся в результате очистки „сухих“ (несмазанных) твердых поверхностей, несомненно, обусловлено стиранием с них различных адсорбированных загрязняющих пленок.

В некоторых случаях в результате тщательной очистки поверхностей удавалось наблюдать особо резкое увеличение коэффициента статического трения. Так, Томлинсон⁶ указывает, что при очень тщательной полировке и очистке поверхностей скольжение кусочка свинца относительно стеклянной пластинки начиналось лишь при приведении их почти в вертикальное положение; коэффициент статического трения, определенный обычным образом [по формуле (1)], принимал при этом бесконечно большое значение.

Иногда удавалось даже перевернуть стеклянную пластинку так, что кусочек свинца оказывался висющим на нижней ее поверхности.

Аналогичные явления были наблюдаемы Томлинсоном также и при изучении статического трения тонких стеклянных и кварцевых нитей.

§ 3. Изучение „сухого“ трения в вакууме

О более или менее совершенной очистке поверхности твердого тела от покрывающих ее адсорбированных пленок можно говорить, конечно, только после длительного прогрева поверхности в условиях высокого вакуума. Изучение трения в вакууме представляет поэтому весьма существенный интерес при рассмотрении вопроса о влиянии адсорбированных пленок на величину коэффициента трения.

Впервые измерение коэффициентов как статического, так и кинетического трения в вакууме было осуществлено Шарлоттой Якоб⁷ в 1912 г. Было изучено трение латуни и стекла в вакууме при прогреве поверхностей до 450°. При этом удалось наблюдать значительное повышение коэффициента статического трения. Ввиду плохой воспроизводимости полученных Якоб результатов мы не будем, однако, останавливаться на их подробном рассмотрении.

В 1929 г. Доу⁸ было изучено статическое трение меди, цинка и алюминия в вакууме 0,1 мм Hg. При этом никаких изменений величин коэффициентов статического трения μ_s по сравнению с их значениями на воздухе обнаружено не было. Этот результат вполне понятен, если принять во внимание весьма несовершенный вакуум и, главное, отсутствие прогрева изучавшихся поверхностей.

В 1930 г. Шоу и Ливи⁹ опубликовали результаты измерений коэффициентов статического трения железа, никеля, меди, серебра, алюминия и стекла, произведенных в вакууме при предшествующем длительном прогреве поверхностей. Ввиду большого интереса полученных при этом данных мы остановимся на их рассмотрении несколько подробнее.

Определение коэффициентов трения производилось по методу „наклонения“ (§ 2). Цилиндрический стержень из изучаемого материала разрезался на 5 частей, четыре из них образовывали две

X-образные подпорки, на которых с начала опыта неподвижно покоилась пята (рис. 1). Вся система находилась внутри свободно вращающейся стеклянной трубки, соединенной с вакуумными насосами. Трубка помещалась в электрическую печь, температура внутри трубки регистрировалась с помощью термопары. После длительной откачки и прогрева трубку отклоняли от горизонтального положения до тех пор, пока стержень не начинал скользить по подпоркам. Начало скольжения отмечалось автоматически падающей, стержень замыкал электрическую цепь, содержащую регистрирующие приборы.

Опыты проводились в вакууме 0,01 мм Hg при прогреве поверхностей до 350°. Они привели к следующим результатам:

1. Если поверхности предварительно не прогревались, то коэффициент статического трения в вакууме был так же низок, как и

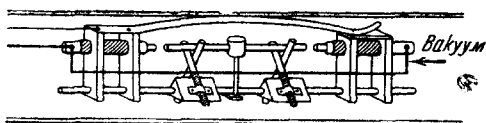


Рис. 1.

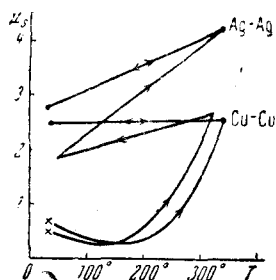


Рис. 2.

на воздухе, и оставался низким после сколь угодно длительной откачки. Численные значения коэффициентов трения всех изучавшихся веществ лежали при этом в интервале между 0,1 и 0,3

2. При прогреве поверхностей в вакууме вначале имеет место незначительное понижение коэффициента трения; дальнейшее повышение температуры до 350° сопровождается, однако, резким возрастанием μ_s . Это повышение μ_s оказывается необратимым — при охлаждении поверхностей коэффициент трения не возвращается к своему первоначальному низкому значению, а лежит значительно выше его. Вторичный прогрев приводит к новому необратимому повышению коэффициента статического трения.

Таблица 1

Материал поверхности	μ_s
Железо	0,8
Никель	1,1
Медь	2,3
Серебро	2,6
Алюминий . . .	3,1

Характер изменения μ_s при изменении температуры иллюстрируется кривыми рис. 2, где по оси абсцисс отложена температура, по оси ординат — коэффициент статического трения μ_s .

В результате ряда повторных нагреваний и охлаждений коэффициент μ_s достигает постоянного высокого значения, уже не меняющегося при дальнейшем изменении температуры (о некоторых исключениях из этого правила см. § 4).

Окончательные значения μ_s (измеренные при комнатной температуре) приведены в табл. 1. Они свидетельствуют о том, что

в результате предварительного прогрева в вакууме коэффициент статического трения очень резко (примерно в 10 раз) возрастает. Приведенные в таблице данные относятся к тому случаю, когда поверхности прогревались, будучи в контакте друг с другом. Если поверхностигреваются, не будучи в контакте, то значения μ_s лежат несколько (примерно на 10%) выше. Это обстоятельство обусловлено, вероятно, тем, что во втором случае условия обезгаживания поверхностей оказываются более благоприятными.

Гольм и Кирштейн¹⁰ изучали статическое трение никеля и платины при более совершенных условиях опыта, нежели это имело место в работе Шоу и Ливи.

В стеклянной трубке, соединенной с вакуумными насосами, натянута тонкая проволочка, до начала опыта расположенная горизонтально. На проволочке висит легкий цилиндр, внутренний диаметр которого несколько больше диаметра проволочки. Трубка откачивается до 10^{-4} мм Hg, весь прибор в течение часа прогревается в печи при 400° , проволочка и цилиндр пропускаем электрического тока прокаливаются при температуре 1000° . После тщательной откачки, прогрева и последующего охлаждения прибора проволочка поворотом шлифа отклоняется от горизонтали до тех пор, пока при некотором значении угла наклона цилиндр не начинает скользить по ней.

Уже после однократного прокаливания коэффициент трения очень велик. В результате многократного прокаливания он возрастает, пока, наконец, не создаются условия, при которых проволока может быть повернута вертикально, а цилиндр все еще не начинает скользить по ней.

Он „прилипает“ к проволоке столь сильно, что только встряхивание всего прибора заставляет его упасть. Обычное определение коэффициента статического трения как тангенса угла, при котором начинается скольжение одной из поверхностей, дает при этом бесконечно большое значение μ_s . Этот результат, а также описанные в предыдущем параграфе опыты сви-

детельствуют о том, что при отсутствии на твердых поверхностях посторонних адсорбированных слоев явление скольжения поверхностей в чистом виде отсутствует, оно заменяется непосредственным сцеплением, прилипанием твердых тел друг к другу.

Гольм и Кирштейн изучили также влияние последующего впуска в вакуум различных газов на величину коэффициента статического трения. При этом оказалось, что химически неактивные газы — аргон и азот — на μ_s не влияют — оно попрежнему остается равным

Таблица 2

Газ	Материал поверхности	
	никель	платина
Вакуум 10^{-4} мм	—	—
Азот	—	—
Аргон	—	—
Водород	1,66	1,88
Сухой воздух	1,66	2,25
Пары воды	0,62	1,38
Бензин	0,45	—
Толуол	0,38	—
Бензол	0,31	—

бесконечности: впуск же воздуха. падов воды. бензина и т. л.

Таблица 3

Коэффициент статического трения и упругие постоянные твердых тел

Материал поверхности	μ_s	g	Условия опыта
Fe	0,8	8300	} „Сухое“ трение в вакууме (данные Шоу и Ливи ⁹)
Ni	1,1	7300	
Cu	2,3	4700	
Ag	2,6	2900	
Al	3,1	2700	
Твердая сталь . . .	0,393	8900	} „Сухое“ трение на воздухе (данные Томлинсона ⁶)
Мягкая сталь . . .	0,411	8100	
Pt	0,445	6200	
Cu	0,600	4700	
Латунь	0,634	3500	
Al	0,937	2700	
Стекло	0,940	2900	
Sn	1,110	1810	}
Pb	3,310	780	
Мягкая сталь . . .	0,74	8100	} „Сухое“ трение на воздухе (данные Гарди ⁵)
Стекло	0,94	2900	
Ni	1,66	7300	} „Сухое“ трение в сухом воздухе (данные Гольма и Кир- штейна ¹⁰)
Pt	2,25	6200	

были даны в 1929 г. Томлинсоном⁶, рассмотрению теории которого посвящен § 25 данной статьи.

§ 6. Трение разнородных поверхностей

Согласно данным ряда авторов, изучавших сухое трение разнородных поверхностей, в обычных условиях опыта коэффициент статического трения вещества A о вещество B (μ_s)_{AB} имеет значение, промежуточное между значениями коэффициентов трения пар однородных поверхностей [(μ_s)_{AA} и (μ_s)_{BB}].

Особенно тщательное исследование трения разнородных поверхностей было проведено Томлинсоном, измерившим коэффициенты статического трения для 55 пар различных твердых поверхностей. Полученные им данные приведены в табл. 4. Во всех случаях удовлетворяется неравенство:

Таблица 4

Значения μ_s по Томлинсону

Материал поверхности	Твердая сталь	Мягкая сталь	Платина	Никель	Медь	Латунь	Алюминий	Стекло	Олово	Свинец
Твердая сталь	0,393	0,410	0,398	0,428	0,548	0,535	0,649	0,605	0,785	1,955
Мягкая сталь	0,410	0,411	0,427	0,429	0,533	0,506	0,705	0,721	0,786	1,930
Платина	0,398	0,427	0,445	0,386	0,592	0,560	0,796	0,569	0,855	2,070
Никель	0,428	0,429	0,386	0,389	0,562	0,504	0,745	0,775	0,895	2,150
Медь	0,548	0,533	0,592	0,562	0,600	0,618	0,695	0,675	0,857	1,945
Латунь	0,535	0,508	0,560	0,584	0,618	0,634	0,706	0,873	0,752	2,110
Алюминий	0,649	0,605	0,796	0,745	0,695	0,706	0,937	0,845	0,905	2,000
Стекло	0,605	0,721	0,569	0,775	0,675	0,873	0,845	0,940	0,941	2,420
Олово	0,786	0,786	0,855	0,845	0,857	0,752	0,905	0,941	1,110	2,250
Свинец	1,955	1,930	2,070	2,150	1,945	2,110	2,000	2,420	2,250	3,310

В случае статического трения в вакууме это соотношение, однако, не оправдывается; в подавляющем большинстве случаев $(\mu_s)_{AB}$ оказывается значительно меньше как $(\mu_s)_{AA}$, так и $(\mu_s)_{BB}$. При этом начинает играть роль новый фактор — средство между веществами *A* и *B*.

В табл. 5 пары разнородных металлических поверхностей расположены в порядке возрастания степени средства между металлами⁹; первые четыре пары металлов в расплавленном состоянии образуют несмешивающиеся жидкости, следующие пары обладают свойством образовывать твердые растворы.

Это расположение металлов в порядке возрастания средства между ними является, как мы видим, в то же время и расположением их в порядке возрастания коэффициентов статического трения. Эту закономерность естественно связать с тем, уже отмеченным выше, обстоятельством, что в вакууме на поверхностях возникают участки непосредственного „прилипания“ твердых тел друг к другу — участки „химического“ контакта.

Прочность такого „химического“ контакта должна определяться степенью средства между телами.

Таблица 5

Трение разнородных поверхностей в вакууме

Поверхности	μ_s
Ag — Fe	0,3
Cu — Fe	0,69
Ni — Fe	0,69
Ag — Ni	0,86
Al — Fe	1,28
Al — Cu	1,47
Ag — Cu	1,72
Cu — Ni	2,01
Al — Ag	2,20
Al — Ni	2,36

Глава II. Кинетическое трение „сухих“ поверхностей

§ 7. Кинетическое трение и скорость. Влияние степени чистоты поверхности

Имеющиеся в литературе данные о зависимости кинетического трения „сухих“ (несмазанных) поверхностей от скорости их относительного движения весьма противоречивы. Кулон отмечает, что на кинетическое трение металлов скорость их движения оказывает весьма малое влияние.

Согласно данным Гонда и Ямада¹², коэффициент кинетического трения μ_k остается постоянным при изменении скорости относительного движения в интервале от 15 до 40 м в минуту.

Гальтон и Вестингауз¹³, а также Смит¹⁴ указывают, однако что по мере убывания скорости коэффициент кинетического трения возрастает.

Наиболее тщательное исследование законов кинетического трения как несмазанных, так и смазанных поверхностей принадлежит Биру и Боудену¹⁵; на рассмотрении полученных ими результатов мы остановимся здесь подробно.

Прибор, применявшийся этими авторами для изучения кинетического трения, весьма прост по своей конструкции; он состоит из металлического махового колеса, на которое надевается одна из трущихся поверхностей, имеющая форму цилиндрического кольца. В начале опыта маховое колесо вращается свободно, затем на него опускаются укрепленные над ним неподвижно небольшие шарики (диаметром 5 мм) из исследуемого материала. Вследствие трения шариков о плоскость вращения колеса постепенно замедляется.

Угловая скорость колеса регистрируется путем фотографирования на движущейся пленке пучка света, отражаемого от укрепленных на колесе зеркал. По снимаемой, таким образом, кривой „замедления“ можно определить обусловленное трением угловое замедление Φ ; с коэффициентом кинетического трения оно связано следующим соотношением:

$$I\Phi = \mu_k F,$$

где I — момент инерции вращающегося колеса, F — общая нормальная сила, l — расстояние трущегося шарика от центра вращения.

В каждом данном опыте авторами определялись последовательные значения коэффициента μ_k при постепенно уменьшающихся скоростях относительного движения трущихся поверхностей. Изучавшиеся поверхности (из стали, никеля и стекла) шлифовались тонким наждаком, полировались, промывались спиртом и высушивались прогревом до 150°.

Опыты показали, что степень чистоты поверхности оказывает чрезвычайно сильное влияние на величину коэффициента кинети-

ческого трения. А именно: если поверхности были очищены и просушены недостаточно тщательно (высушены при комнатной температуре), то с течением времени, т. е. по мере убывания относительной скорости трущихся поверхностей, коэффициент трения μ_k заметно возрастал. Так например, в случае трения стальных поверхностей за 3 мин. после начала опыта коэффициент трения увеличился от 0,27 до 0,40.

Если же поверхности были тщательно очищены и столь же тщательно высушены (прогревом до 150°), то последовательные измерения, произведенные при различных скоростях в интервале от 600 до 60 см/сек, во всех случаях давали постоянное значение коэффициента μ_k ; для стальных поверхностей оно равнялось 0,41.

Эти опыты достаточно ясно свидетельствуют о том, что коэффициент кинетического трения μ_k непосредственно от скорости не зависит; наблюдающееся же в случае недостаточно чистых поверхностей возрастание коэффициента трения μ_k обусловлено, конечно, не изменением скорости, а постепенным удалением в процессе трения различных загрязняющих поверхности адсорбированных пленок.

Можно думать, что наблюдавшееся некоторыми авторами возрастание μ_k с уменьшением скорости обусловлено аналогичной причиной.

Весьма интересно было бы иметь возможность сравнить между собой значения коэффициентов статического и кинетического трения различных твердых поверхностей. Нам неизвестны, однако, работы, в которых были бы приведены данные для коэффициентов μ_s и μ_k одновременно. Сопоставление же данных различных авторов представляется нам бессмысленным ввиду специфической зависимости как μ_s , так и μ_k от условий опыта.

§ 8. Кинетическое трение и закон Амонтона

Измерения коэффициентов трения тщательно очищенных стальных поверхностей при различных значениях нормальной нагрузки, приложенной к поверхностям, показали, что коэффициент кинетического трения μ_k от нагрузки не зависит; закон Амонтона оказывается, таким образом, справедливым.

Изучение кинетического трения стальных поверхностей, загрязненных длительным пребыванием на воздухе, привело, однако, к несколько неожиданному результату: в этом случае при увеличении нагрузки коэффициент кинетического трения заметно возрастает. В табл. 6¹⁵ приведены соответствующие значения коэффициента μ_k , измеренные при различных значениях нагрузки.

Наличие на трущихся поверхностях загрязняющих покрытий приводит, таким образом, к кажущимся отклонениям от закона Амонтона.

Таблица 6

Нагрузка в г	μ_k
10,8	0,277
22,3	0,295
38,5	0,369
63,8	0,431

Можно предполагать, что при увеличении нагрузки имеет место более интенсивное изнашивание загрязняющих поверхности пленок, что и приводит к увеличению коэффициента трения.

В пользу такого предположения свидетельствует то обстоятельство, что это возрастание коэффициента μ_k не является вполне обратимым.

Так например, если после того, как была приложена нагрузка 63,8 г, приложить снова начальную нагрузку 10,8 г, то значение коэффициента трения будет иметь уже не первоначальное значение 0,277 (табл. 6), а повышенное — 0,371.

§ 9. Кинетическое трение в различных газах

Биром и Боуденом¹⁵ были произведены измерения коэффициента кинетического трения стальных поверхностей в различных газах: в воздухе, кислороде, углекислоте и в азоте. При этом оказалось, что величина μ_k с точностью, лежащей в пределах ошибок опыта, от природы окружающей газообразной среды не зависит. Соответствующие значения μ_k приведены в табл. 7.

Таблица 7

Газ	μ_k
Воздух	0,57
O ₂	0,58
N ₂	0,57
CO ₂	0,57

В процессе трения, как это было уже установлено выше, имеет место постепенное изнашивание покрывающих поверхности адсорбированных пленок. Те части поверхности, с которых пленка уже стерлась, должны особенно быстро вновь покрываться атомами, адсорбированными из окружающей среды. Природа окружающей среды должна была бы поэтому, казалось, оказывать весьма существенное влияние на величину коэффициента кинетического трения. То обстоятельство, что на самом деле μ_k от природы газа не зависит, можно, как нам кажется, попытаться объяснить с помощью утверждения, что в процессе трения имеет место не только изнашивание адсорбированных на поверхности пленок, но также и весьма интенсивное изнашивание, стирание самой твердой поверхности. Можно думать, что в отличие от случая статического трения (где природа окружающей среды оказывает сильное влияние на величину коэффициента трения, § 3) при кинетическом трении это изнашивание самой поверхности играет весьма существенную роль. Природа окружающей среды при таких условиях на величину коэффициента трения, конечно, никакого влияния оказывать не должна. В пользу такой точки зрения свидетельствует ряд опытных фактов, в первую очередь — явление износа, почти всегда сопровождающее на практике кинетическое трение, а также приводимые ниже данные о зависимости коэффициента кинетического трения от степени полировки трущихся поверхностей.

§ 10. Кинетическое трение и предварительная полировка поверхностей

Предварительная полировка трущихся поверхностей не всегда оказывает одинаковое влияние на величину коэффициента кинетического трения. Согласно данным Бира и Боудена¹⁵ предшествующая полировка плоской поверхности понижает коэффициент кинетического трения только в том случае, когда трущиеся о нее шарики (описание методики в § 7) — из более мягкого материала, нежели она сама.

Таблица 8

Поверхность	μ_k
Шлифованная сталь	0,552
Полированная сталь	0,449
Шлифованное стекло	0,457
Полированное стекло	0,309

Таблица 9

Материал поверхности	μ_k
Стекло	0,40
Никель	0,53
Сталь	0,57

В табл. 8 приведены значения коэффициента μ_k для трения шариков из кадмия о полированные и неполированные поверхности стали и стекла.

Если же шарики — из более твердого материала, нежели поверхность, о которую они трутся, то коэффициент трения от начальной полировки этой поверхности не зависит; для неполированной поверхности он имеет то же значение, что и для поверхности полированной.

В этом случае полировка поверхности, повидимому, весьма быстро осуществляется в самом процессе трения, мягкие же шарики отполировать ее не могут.

Предварительная полировка поверхностей влияет, таким образом, на величину коэффициента кинетического трения μ_k только тогда, когда само трение не сопровождается полировкой.

Здесь уместно было бы остановиться на кратком изложении современных представлений о сущности процесса полировки твердых поверхностей. Мы, однако, несколько отложим рассмотрение этого вопроса (§ 12).

§ 11. Кинетическое трение однородных и разнородных поверхностей

Численные значения коэффициента кинетического трения, полученные Биром и Боуденом¹⁵ для трения некоторых однородных поверхностей, приведены в табл. 9.

Последовательность коэффициентов μ_k никеля и стали отвечает их расположению в порядке убывания модулей упругости; коэффициент μ_k для стекла должен был бы, однако, превышать как μ_k для никеля, так и μ_k для стали (§ 5). Ввиду малого количества экспериментальных данных вопрос о том, имеется ли между коэффициентами кинетического трения „сухих“ поверхностей и упругими постоянными связь того же типа, что и в случае статического трения, остается открытым.

В случае трения разнородных поверхностей картина сильно осложняется тем обстоятельством, что коэффициент кинетического трения вещества *A* о вещество *B* имеет существенно различное значение в зависимости от того, из какого материала состоит меньшая из трущихся поверхностей (шарик) и из какого — большая (плоскость). Так например, при трении стальных шариков о никелевую поверхность $\mu_k = 0,49$, при трении же никелевых шариков о стальную поверхность $\mu_k = 0,66$. Численные данные о трении разнородных поверхностей приведены в табл. 10.

Таблица 10

Материал шарика	Материал плоской поверхности		
	сталь	никель	стекло
	μ_k		
Сталь	—	0,49	0,61
Никель	0,66	—	0,56
Стекло	0,51	0,50	—
Медь	0,36	0,49	0,53
Уголь	0,21	0,24	0,18

Бир и Боуден¹⁵ отмечают, что μ_k принимает большие значения в том случае, когда меньшая из трущихся поверхностей состоит из более мягкого материала. Если меньшая из поверхностей (шарик) — из мягкого материала, то коэффициент трения возрастает по мере уменьшения твердости второй из трущихся поверхностей.

Если же шарик из твердого материала, то наблюдается обратная закономерность — μ_k возрастает по мере увеличения твердости второй поверхности.

Эти факты легко могут быть объяснены в предположении, что сам процесс трения сопровождается полировкой более мягкой из трущихся поверхностей. Действительно, в том случае, когда меньшая из поверхностей — из мягкого материала, то она сама полируется в процессе трения; при уменьшении твердости второй поверхности она полируется в меньшей степени, что приводит к увеличению коэффициента μ_k . В том случае, когда меньшая из поверхностей — из твердого материала, сама она при трении не полируется, но полирует вторую поверхность.

Коэффициент кинетического трения вещества A о вещество B оказывается, таким образом, отличным от коэффициента трения вещества B о вещество A . Простые закономерности, наблюдающиеся при статическом трении, сильно усложняются в этом случае сопутствующей трению полировкой поверхностей.

§ 12. Измерение температуры трущихся поверхностей; плавление поверхности и полировка

Измерение температуры трущихся поверхностей впервые было осуществлено в 1936 г. Боуденом¹⁶ с помощью столь же простой, сколь и остроумной методики. Она основана на том, что если трущиеся поверхности принадлежат разнородным металлам и если в процессе трения на границе раздела поверхностей имеет место повышение температуры, то сами трущиеся тела будут представлять собой термопару.

Замкнув трущиеся тела в электрическую цепь, содержащую соответственно проградуированные измерительные приборы, Боудену удалось измерить температуру трущихся поверхностей и исследовать

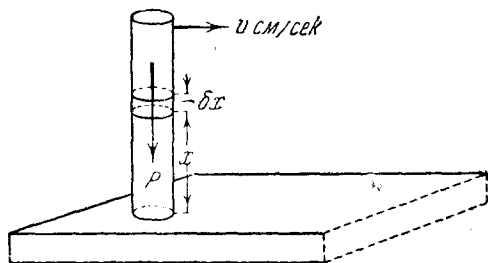


Рис. 4.

зависимость ее от скорости относительного движения поверхностей, величины прилагаемой нагрузки и прочих параметров.

Обнаруженные закономерности находятся при этом в хорошем согласии со следующим, произведенным Боуденом, приближенным теоретическим расчетом повышения температуры на границе раздела поверхностей.

При трении цилиндра о плоскость (именно этот случай имел место в опытах Боудена) количество тепла, получаемого элементом δx цилиндра (рис. 4) вследствие нагревания его нижнего основания, равняется

$$K\pi r^2 \frac{d^2 T}{dx^2} \delta x,$$

где r — радиус цилиндра, K — коэффициент теплопроводности материала цилиндра.

Количество тепла, испускаемого элементом δx в окружающую среду

$$2\pi r\sigma (T - T_0) \delta x,$$

где σ — коэффициент, T_0 — температура окружающей среды.

Интегрируя условие стационарности теплового потока

$$K\pi r^2 \delta x \frac{d^2 T}{dx^2} - \sigma 2\pi r \delta x (T - T_0) = 0,$$

Боуден получает повышение температуры внутри трущегося цилиндра на расстоянии x от плоскости скольжения

$$T - T_0 = \Delta T = C e^{-\sqrt{\frac{2\sigma}{Kr}} x}. \quad (1)$$

Постоянную C он определяет из тех соображений, что все излучаемое в окружающее пространство тепло получено за счет работы силы трения. Если вся работа силы трения переходит в тепло, то количество тепла

$$Q = \mu_k P v,$$

где P — нормальная нагрузка, v — скорость относительного движения трущихся тел, μ_k — коэффициент кинетического трения.

Полагая

$$Q = 2\pi r \sigma \int_0^{\infty} (T - T_0) dx$$

и воспользовавшись уравнением (1), получаем

$$C = \frac{1}{\pi r} \frac{1}{\sqrt{2\sigma Kr}},$$

откуда окончательно:

$$\Delta T = \frac{\alpha Q}{\pi r \sqrt{2\sigma Kr}}. \quad (2)$$

Повышение же температуры трущихся поверхностей ($x = 0$)

$$\Delta T = \frac{\alpha Q}{\pi r \sqrt{2\sigma Kr}} = \frac{\alpha \mu_k P v}{\pi r \sqrt{2\sigma Kr}}. \quad (3)$$

Оно оказывается, таким образом, прямо пропорциональным величине нагрузки и скорости относительного движения тел и обратно пропорциональным корню квадратному из коэффициента теплопроводности материала цилиндра (при этом предполагается, что масса цилиндра очень мала по сравнению с массой второго тела). На рис. 5 и 6 приведены графики зависимости температуры трущихся поверхностей от нагрузки P и скорости относительного движения v , полученные Боуденом для случая „сухого“ трения цилиндра из константана о стальную плоскость; они показывают, что закономерность (3) прекрасно оправдывается на опыте.

Исследованный при этом интервал скоростей — от 4 до 5000 см/сек, нагрузок — до 120 г.

Что же касается зависимости температуры трущихся поверхностей от коэффициента теплопроводности, то она оправдывается несколько хуже. Причина этого обстоятельства заключается, как нам кажется, в том, что в приведенном выше расчете Боуден полагал, что контакт между трущимися телами осуществляется по всей плоскости основания цилиндра. На самом деле это, конечно, не так; контакт между трущимися телами осуществляется лишь в отдельных весьма небольших участках соприкасающихся поверхностей.

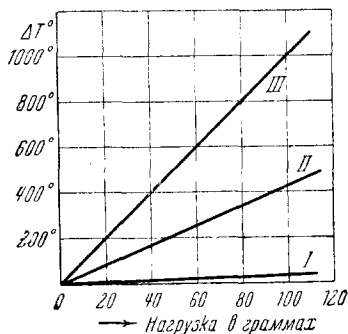


Рис. 5.

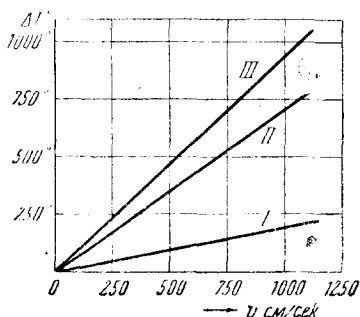


Рис. 6.

Попытка учета этого обстоятельства ¹⁾ привела к той же зависимости ΔT от P и v , что и в работе Боудена, и к обратной пропорциональности между ΔT и коэффициентом теплопроводности K (но не корнем квадратным из K). Как показал произведенный

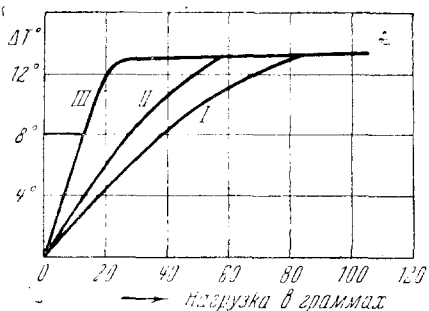


Рис. 7.

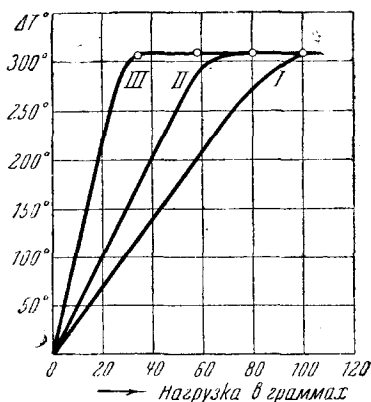


Рис. 8.

нами пересчет приводимых Боуденом данных, соотношение $\Delta T \sim \frac{1}{K}$ оправдывается достаточно хорошо.

Приведенные на рис. 5 и 6 прямые относятся к случаю трения двух тугоплавких металлов — константана и стали.

¹⁾ Осуществленная Я. И. Френкелем.

В случае трения легкоплавких металлов — галлия, висмута свинца, сплава Вуда и т. д. — о стальную поверхность графит зависимости температуры трущихся поверхностей от нагрузки F и от скорости относительного движения v имеет совсем иной характер (рис. 7 и 8): вначале оправдывается найденное выше соотношение (3), начиная же с некоторой (для различных тел различной) температуры, дальнейшее возрастание температуры прекращается; при дальнейшем увеличении нагрузки или скорости температура остается постоянной. Эта постоянная температура в пределах ошибок опыта совпадает с температурой плавления материала трущегося цилиндра. Так например, в случае галлия дальнейшее возрастание температуры прекращается при 32° , в случае сплава Вуда — при 72° , свинца — при 327° , висмута — при 270° .

Уже давно высказывалось предположение, что нагревание поверхностей при трении должно играть большую роль для процесса полировки твердых тел. Многие авторы¹⁷ полагают, что полировка твердых тел связана с плавлением их поверхности. Боуден¹⁸ отмечает, что если эта точка зрения верна, то для возможности полировки большую роль должно играть соотношение между температурами плавления полирующего вещества и полируемого твердого тела. Если полирующее вещество плавится или размягчается при более низкой температуре нежели полируемое твердое тело, то при нагревании оно начнет плавиться и течь и окажет весьма малое воздействие на полируемое тело. Сопоставление опытных данных о температурах плавления полирующих веществ и полируемых тел показывает, что полировка (и образование аморфного слоя — так называемого „слоя Бейльби“) имеет место только тогда, когда температура плавления полирующего вещества выше температуры плавления полируемого твердого тела. Относительная твердость тел при этом существенной роли не играет.

Так например, камфора (температура плавления 178°) полирует сплав Вуда (температура плавления 69°), но не полирует металлов, плавящихся при более высоких температурах, например олова (температура плавления 232°). Кальцит (температура плавления 1333°) можно полировать окисью цинка (температура плавления 1800°), но нельзя полировать окисью меди (температура плавления 1235°). Таких примеров можно было бы привести очень много.

Приведенные выше данные об измерении температуры трущихся поверхностей представляют собой замечательное опытное подтверждение гипотезы о плавлении поверхности твердых тел при трении и дают право думать, что в процессе полировки твердых тел такое плавление действительно должно играть весьма существенную роль.

Глава III. Статическое трение смазанных поверхностей

§ 13. Два типа смазки

Принято различать два типа смазки: смазку „полную“, или „совершенную“, и смазку „граничную“, или „частичную“.

Смазку называют „полной“, если твердые поверхности полностью отделены друг от друга достаточно толстым слоем смазывающего вещества. В этом случае статическое трение как таковое с теоретической точки зрения вообще не должно было бы наблюдаться; практически же оно очень ничтожно — достаточно очень небольшого тангенциального усилия, чтобы началось относительное скольжение поверхностей. Сопротивление движению в этом случае совершенно не зависит от природы твердых поверхностей, полностью определяясь свойствами смазывающего вещества; оно оказывается при этом пропорциональным вязкости последнего. На практике стремятся обычно осуществить именно этот тип смазки.

В процессе трения различных частей механизмов имеет, однако, место постепенное утоньшение, изнашивание слоя смазки, сопровождающееся постепенным переходом от условий „совершенной“ смазки к смазке „граничной“, или „частичной“.

Под „граничным“ смазыванием подразумевают тот случай, когда сопротивление относительному движению поверхностей определяется не только свойствами самой смазки, но зависит также и от природы твердых поверхностей. В этом случае непосредственной зависимости коэффициента трения от вязкости смазки не наблюдается, величина коэффициента трения определяется совсем иными параметрами. Численное значение коэффициента трения в случае „граничной“ смазки значительно выше, нежели в случае смазки „совершенной“.

Для разных смазывающих веществ переход от „совершенной“ смазки к смазке „граничной“ осуществляется при различных условиях. При изучении кинетического трения стальных поверхностей Биру и Боудену¹⁵ удалось наблюдать этот переход непосредственно. На рис. 9 приведен снятый ими график изменения угловой скорости одной из трущихся поверхностей с течением времени (подробное описание прибора и методики в § 7).

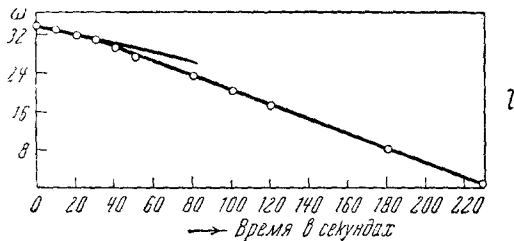


Рис. 9.

Вначале коэффициент кинетического трения возрастает (криволинейный участок графика); через некоторый промежуток времени после начала опыта угловое замедление приобретает, однако, постоянное значение, что отвечает переходу к „граничной“ смазке, характеризующейся постоянным значением коэффициента трения. Приведенная кривая относится к случаю трения стальных поверхностей, смазанных октиловым спиртом; начальному моменту времени отвечает коэффициент кинетического трения $\mu_k \approx 0,02$; в условиях „граничной“ смазки (прямолинейная часть графика) $\mu_k = 0,073$.

коэффициента в опытах Гарди довольно велика — в качестве примера в табл. 11 приведены значения μ_s , полученные Гарди при различных значениях нагрузки.

Таблица 11

Нагрузка в г	μ_s
21,63	0,6321
31,64	0,6354
41,63	0,6301
51,63	0,6298
61,63	0,6352

Изученный при этом интервал нагрузок простирается от 20 до 534 г. Исследования Гарди позволяют, таким образом, считать, что при этих условиях закон Амонтона, упоминавшийся в самом начале нашей статьи как основной закон трения, действительно оказывается справедливым.

б. Трение плоских поверхностей

В случае трения плоской поверхности о плоскую зависимость коэффициента трения от нагрузки, как это следует из рис. 11, оказывается совершенно иной, нежели в предыдущем случае, а именно: в области малых нагрузок коэффициент трения μ_s при возрастании нагрузки убывает (часть AB кривой на рис. 11) до тех пор, пока при некоторой нагрузке (точка B) величина μ_s не достигает минимального значения, остающегося неизменным при дальнейшем увеличении нагрузки ¹⁾.

Это минимальное значение μ_s лежит несколько выше постоянного значения μ_s , отвечающего случаю трения сферической поверхности о плоскую (для того же материала и при том же смазывающем веществе) (пунктирные прямые на рис. 11).

Так например, в случае плоских стальных поверхностей, смазанных нонадеканом, при увеличении давления от 96 до 12000 г/см² μ_s убывает от 0,305 до 0,184, тогда как если одна из стальных поверхностей имеет сферическую форму, коэффициент μ_s при всех нагрузках остается постоянным и равным 0,181.

Чем больше радиус кривизны поверхности, тем больше нормальное давление (нагрузка, деленная на площадь контакта) между трущимися поверхностями; при данной нагрузке в случае б мы имеем дело с большим нормальным давлением, нежели в случае а.

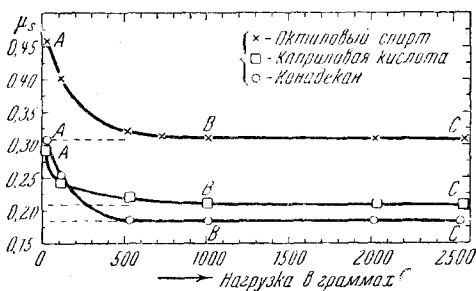


Рис. 11.

¹⁾ Аналогичную кривую зависимости μ_s от нагрузки приводят также Шоу и Ливи⁹ для случая «сухого» трения некоторых поверхностей (алюминия об алюминий и меди о медь).

Приведенные выше данные свидетельствуют о том, что в случае трения сферической поверхности о плоскую закон Амонтона оправдывается при всех изученных значениях нагрузки; в случае же трения двух плоских поверхностей закон Амонтона оправдывается, лишь начиная с некоторого минимального значения нагрузки (точка *B* кривой). Это дает нам возможность прийти к несколько более общему заключению о том, что при малых значениях нормального давления (область малых нагрузок в случае трения плоских поверхностей) закон Амонтона не справедлив; он вступает в силу, лишь начиная с некоторого минимального значения нормального давления (область больших нагрузок в случае трения плоских поверхностей и случай трения сферической поверхности о плоскую). Переход от условий, при которых закон Амонтона места не имеет, к условиям, отвечающим его выполнению, определяется, таким образом, исключительно величиной нормального давления между трущимися поверхностями.

Вопрос о физической природе как самого закона Амонтона, так и наблюдающихся от него отклонений остается, однако, открытым. В дальнейшем мы попытаемся наметить возможные пути его рассмотрения.

§ 16. Латентный период

При изучении статического трения смазанных поверхностей Гарди^{20, 19} обнаружил следующее весьма любопытное обстоятельство: коэффициент статического трения приобретает постоянное значение, не меняющееся в дальнейшем, лишь через некоторый промежуток времени после того, как трущиеся поверхности приведены в соприкосновение друг с другом. Этот промежуток времени, в течение которого происходит установление стационарного значения коэффициента μ_s , Гарди называет латентным периодом.

Длительность латентного периода и характер изменения коэффициента статического трения в течение этого периода оказываются весьма различными в зависимости от величины давления между поверхностями, температуры, химической природы смазки и прочих условий опыта.

В случае трения плоских поверхностей при малых нагрузках во время латентного периода имеет место возрастание коэффициента статического трения¹⁾. При данной нагрузке длительность латентного периода для разных смазывающих веществ различна. В табл. 12 приведены значения коэффициента статического трения плоских стальных поверхностей, измеренные через разные промежутки времени после приведения поверхностей в соприкосновение друг с другом. Длительность латентного периода в этом случае весьма велика — она достигает нескольких часов.

Увеличение коэффициента статического трения с течением времени Гарди²⁰ рассматривает как результат постепенного падения

1) На рис. 11 приведены окончательные стационарные значения μ_s .

Таблица 12

Ламповое масло		Октиловый спирт	
время от начала опыта	μ_s	время от начала опыта	μ_s
5 сек.	0,02	3 сек.	0,13
1 мин.	0,11	5 мин.	0,38
1 час	0,304	1 час	0,469
3 часа	0,331	3 часа	0,484
8 час.	0,338	6 час.	0,485

верхней поверхности через слой смазывающего вещества, т. е. как результат постепенного выжимания смазывающего вещества из пространства между твердыми поверхностями. Такое выжимание приводит к уменьшению расстояния между твердыми поверхностями, т. е. к увеличению сил сцепления между ними, что и обуславливает возрастание коэффициента трения.

Чем больше давление между поверхностями, тем быстрее должно происходить выжимание смазывающего вещества. Действительно, латентный период очень резко зависит от величины нагрузки, уменьшаясь с возрастанием последней; так например, в случае трения плоских стальных поверхностей, смазанных нонадеканом при увеличении нагрузки от 120 до 820 г, латентный период уменьшается от 12 до 1 мин.

В случае трения сферической поверхности о плоскую, т. е. в случае больших давлений между трущимися поверхностями, описанный выше латентный период „выжимания“ отсутствует, т. е. время, необходимое для выжимания смазки, настолько уменьшается, что становится практически ненаблюдаемым.

Но и в этом случае коэффициент статического трения не сразу достигает своего стационарного значения, т. е. также наблюдается латентный период; в течение этого латентного периода коэффициент статического трения, однако, не возрастает, как во время описанного выше периода выжимания, а убывает.

Таблица 13

Смазывающее вещество	Начальное значение μ_s	Конечное значение μ_s	Латентный период в минутах
Каприловая кислота	0,57	0,34	60
Энантовая кислота	0,50	0,40	45
Октиловый спирт	0,59	0,52	15

В табл. 13¹⁹ приведены данные о трении сферической стальной поверхности о плоскую для некоторых смазывающих веществ. Первый столбец таблицы содержит начальные значения коэффициента трения, измеренные непосредственно после приведения смазанных поверхностей в соприкосновение друг с другом, второй столбец— окончательные стационарные значения коэффициента трения, третий—длительность периода установления этих стационарных значений.

Если объяснение возрастания коэффициента статического трения, имеющего место при латентном периоде „выжимания“, не встречает особых трудностей, то объяснение такого убывания коэффициента трения с течением времени является значительно более затруднительным.

Гарди²⁰ предполагает, что это убывание коэффициента трения связано с постепенным увеличением степени ориентации молекул в слое смазывающего вещества, а латентный период рассматривает как время, необходимое для достижения некоторой равновесной ориентации.

В отличие от описанного выше латентного периода „выжимания“ мы будем называть этот период латентным периодом „ориентации“. В пользу справедливости этой точки зрения свидетельствует следующее чрезвычайно любопытное обстоятельство: латентный период „ориентации“ имеет место в случае смазывания поверхностей жирными кислотами и спиртами и никогда не наблюдается при применении в качестве смазки парафинов.

Молекулы парафинов, как известно, не обладают полярностью, они построены симметрично, имея на концах группы CH_3 ; молекулы же жирных кислот и спиртов обладают ясно выраженной полярностью. Характер расположения молекул парафинов в смазывающем слое не должен поэтому играть роли при определении условий скольжения поверхностей; в слое же, содержащем полярные молекулы кислот или спиртов, с течением времени будет происходить установление некоторой равновесной ориентации, приводящее к облегчению соскальзывания твердых поверхностей друг относительно друга.

В молекулах жирных кислот и спиртов принято различать „голову“ (группа COOH у жирных кислот и группа OH у спиртов) и „хвост“ (группа CH_3 как у кислот, так и у спиртов).

Согласно Лэнгмюру в случае мономолекулярного слоя равновесной, наиболее выгодной в энергетическом отношении ориентацией этих молекул является такая, при которой они расположены перпендикулярно к твердой поверхности, прикрепляясь к ней „головами“.

Можно предполагать, что именно такая ориентация устанавливается в первом мономолекулярном слое смазки, непосредственно прилегающем к твердой поверхности.

В рассматриваемом случае следует, повидимому, говорить не об одной лишь ориентации молекул смазывающего вещества относительно твердых поверхностей, но об объемной ориентации во

всем слое смазывающего вещества, заключенном между твердыми поверхностями. Об этом свидетельствуют следующие, приводимые Гарди опытные факты. Если каждая из твердых поверхностей в отдельности находилась некоторое время до опыта в атмосфере насыщенного пара смазывающего вещества, то латентный период ориентации оказывался затем сильно сокращенным. Приведенные в табл. 14 данные относятся к случаю трехчасового пребывания

Таблица 14
(Латентный период — 5 мин.)

Смазывающее вещество	Начальное значение μ_s	Конечное значение μ_s
Каприловая кислота .	0,45	0,34
Энантовая кислота .	0,48	0,40
Октиловый спирт . .	0,54	0,52

поверхностей в атмосфере насыщенного пара смазки, латентный период сократился в результате до 5 мин. (для сравнения см. предыдущую таблицу). При этих условиях на каждой из поверхностей уже до опыта должен был образоваться ориентированный слой смазки; действительно, начальные значения коэффициента трения в этом случае ниже начальных значений μ_s , получаемых обычно (табл. 13). После приведения поверхностей в соприкосновение друг с другом наблюдается, однако, дальнейшее понижение коэффициента μ_s , связанное, по видимому, с дальнейшим изменением степени ориентации уже во всем слое смазывающего вещества.

Такой слой полностью теряет свои жидкие свойства, состояние его не имеет ничего общего с состоянием смазывающего слоя в условиях „полной“ или „совершенной“ смазки.

Латентный период „ориентации“, как этого и следовало ожидать, в резкой степени зависит от температуры опыта, убывая с возрастанием последней. Так например: повышение температуры опыта от 15 до 70° в случае смазки октиловым спиртом укорачивает латентный период от 30 до 3 мин., каприловой кислотой — от 45 до 5 мин. Эти данные также свидетельствуют в пользу предположения Гарди об ориентационной природе латентного периода — повышение температуры должно приводить к более быстрому установлению равновесной ориентации в слое смазки, т. е. к сокращению латентного периода.

Вопрос о кинетике латентного периода ориентации рассмотрен в работе Дерягина²² в предположении бимолекулярной структуры смазывающего слоя. Дерягин подразделяет (согласно гипотезе Гарди) ориентированные молекулы на два класса: устойчиво ориентированные (с поверхностной концентрацией x_1) и неустойчиво ориентированные (расположенные под углом 180° в отношении

молекул первого класса ¹⁾ с поверхностной концентрацией x_2 . „Степень ориентации“, определяемую отношением $\frac{x_1}{x_2}$, он вычисляет с помощью уравнений мономолекулярного изменения концентраций x_1 и x_2 . Получаемые при этом результаты находятся в качественном согласии с опытными данными.

Возможность наблюдать оба латентных периода или какой-либо один из них связана с их относительной длительностью. Согласно Гарди ²⁰ в случае малых давлений латентный период „ориентации“ трудно обнаружить из-за большой величины периода „выжимания“; в случае больших давлений имеем обратную картину.

Но и при малых давлениях (в случае трения плоских поверхностей) удастся наблюдать латентный период „ориентации“, если осуществить смазывание каждой из поверхностей путем получения слоя смазки из насыщенного пара и дать ему притти в устойчивое состояние до приведения поверхностей в соприкосновение друг с другом. В этом случае слой смазывающего вещества, по-видимому, значительно тоньше, нежели в случае обычного непосредственного смазывания поверхностей, что значительно сокращает период „выжимания“; после приведения смазанных, таким образом, поверхностей в соприкосновение, в случае кислот и спиртов коэффициент трения с течением времени падает, в случае парафинов — остается неизменным.

Большой интерес представляют приводимые Гарди ¹⁹ данные (табл. 15) о статическом трении сферической поверхности о пло-

Таблица 15

Смазывающее вещество	Начальное значение μ_s	Максимальное значение μ_s	Конечное значение μ_s
Каприловая кислота	0,26	0,44	0,34
Энантовая кислота	0,31	0,46	0,40
Октиловый спирт	0,47	0,54	0,52

скую для того случая, когда на каждую из поверхностей до опыта был нанесен толстый слой смазывающего вещества. При этом вначале имеет место возрастание коэффициента трения μ_s до некоторого $\mu_{s\max}$, а затем убывание его до обычного стационарного значения, т. е. наблюдаются оба латентных периода — как „выжимания“, так и „ориентации“.

Эти данные можно, пожалуй, рассматривать, как непосредственно свидетельствующие о правильности изложенных представлений о приходе латентных периодов.

¹⁾ Ориентация, параллельная поверхности, при этом из рассмотрения исключается как невыгодная в энергетическом отношении,

§ 17. Статическое трение однородных и разнородных смазанных поверхностей

В случае трения однородных несмазанных поверхностей расположение веществ в порядке возрастания коэффициентов статического трения, как это уже отмечалось выше (§ 5), является одновременно их расположением в порядке убывания упругих модулей. Эта последовательность коэффициентов статического трения, как показал Гарди, сохраняется и для смазанных поверхностей при смазке их нормальными парафинами, спиртами и жирными кислотами. Во всех случаях коэффициент статического трения стекла превышает коэффициент статического трения стали, последний же превышает коэффициент трения висмута.

В случае трения разнородных смазанных поверхностей коэффициент статического трения вещества A о вещество B , как и при „сухом“ трении, имеет значение, промежуточное между коэффициентами трения пар однородных поверхностей $[(\mu_s)_{AA} < (\mu_s)_{AB} < (\mu_s)_{BB}]$. Согласно данным Гарди это значение весьма близко к среднему арифметическому коэффициентов $(\mu_s)_{AA}$ и $(\mu_s)_{BB}$.

Таблица 16

Трение однородных и разнородных смазанных поверхностей

Материал нижней плоскости	Материал — сферическо- го ползунка	Смазывающее вещество			
		бутиловый спирт		октиловый спирт	
		μ_s	$\bar{\mu}_s$	μ_s	$\bar{\mu}_s$
Стекло	Стекло	0,606	—	0,5176	—
Сталь	Сталь	0,3924	—	0,2981	—
Висмут	Висмут	0,30	—	0,25	—
Сталь	Стекло	0,493	0,4992	0,41	0,4078
Стекло	Висмут	0,451	0,453	0,38	0,3837
Сталь	Висмут	0,348	0,3464	0,27	0,274

В табл. 16 приведены коэффициенты статического трения μ_s некоторых однородных и разнородных поверхностей, смазанных бутиловым и октиловым спиртами, а также средние арифметические значения $(\bar{\mu}_s)_{AB}$, вычисленные по формуле

$$(\bar{\mu}_s)_{AB} = \frac{(\mu_s)_{AA} + (\mu_s)_{BB}}{2}.$$

Совокупность этих данных позволяет нам прийти к заключению, что в условиях „граничной“ смазки упругие свойства твердых

поверхностей играют точно такую же роль, как и в случае „сухого“ трения.

§ 18. Роль химической природы смазывающего вещества

Зависимость коэффициента статического трения от природы смазывающего вещества была подробно изучена Гарди и Дубльдей^{5, 20, 21} для различных твердых поверхностей (стекла, висмута и разных сортов стали) в условиях „граничной“ смазки их нормальными парафинами, спиртами и жирными кислотами.

Найденные при этом закономерности оказались чрезвычайно простыми. Они могут быть сформулированы следующим образом:

1. Для членов данного гомологического ряда (парафинов, спиртов, кислот) коэффициент статического трения убывает по мере увеличения молекулярного веса смазывающего вещества M . При этом достаточно точно оправдывается соотношение

$$\mu_s = \text{const} - aM,$$

где коэффициент пропорциональности a не зависит от природы твердой поверхности и является свойством данного гомологического ряда. Численные значения коэффициентов трения приведены в табл. 17, где члены каждого из гомологических рядов расположены в порядке возрастания молекулярного веса M . Убывание коэффициента трения с увеличением молекулярного веса смазывающего вещества, согласно Гарди, является следствием удлинения углеводородной цепи молекулы смазки, приводящего к увеличению расстояния между твердыми поверхностями.

В качестве аналога можно было бы рассмотреть трение двух волосяных щеток друг о друга. Чем длиннее щетинки щеток, тем легче скользят они друг по другу.

2. Для членов данного гомологического ряда (парафинов, спиртов, жирных кислот) прямые

$$\mu_s = \text{const} - aM,$$

построенные для различных твердых поверхностей (стали, стекла, висмута), оказываются параллельными друг другу. Гарди полагает

$$\mu_s = b - aM,$$

где b в общем случае зависит как от природы твердой поверхности, так и от химической природы смазывающего вещества (принадлежности его к тому или иному гомологическому ряду). Для данного гомологического ряда и данной твердой поверхности b постоянно.

На рис. 12, 13 и 14 приведены соответствующие прямые для стальных и стеклянных поверхностей, смазанных парафинами, спиртами и жирными кислотами; на оси абсцисс отложен молекулярный вес смазки M , на оси ординат — коэффициент статического трения.

Таблица 17

Смазывающее вещество	Химическая формула	Молеку- лярный вес	Материал поверхности		
			стекло	сталь	висмут
Парафины					
Пентан	C_5H_{12}	72	0,7102	0,4763	—
Гексан	C_6H_{14}	86	0,6908	0,4528	0,37
Гептан	C_7H_{18}	100	0,6751	—	0,346
Октан	C_8H_{18}	114	0,6552	0,3421	0,32
Ундекан	$C_{11}H_{24}$	156	0,5903	0,1785	—
Нонадекан	$C_{19}H_{40}$	268	0,4119	—	—
Тетракозан	$C_{24}H_{50}$	338	0,3251	—	—
Спирты					
Метиловый	CH_3OH	32	0,6772	0,4610	0,29
Этиловый	C_2H_5OH	46	0,6512	0,4408	0,32
Пропиловый	C_3H_7OH	60	0,6301	0,4173	0,34
Бутиловый	C_4H_9OH	74	0,6061	0,3924	0,30
Амиловый	$C_5H_{11}OH$	88	0,5854	0,3752	0,27
Октиловый	$C_8H_{17}OH$	130	0,5176	0,2981	0,25
Ундециловый	$C_{11}H_{23}OH$	172	0,4455	0,2298	—
Цетиловый	$C_{16}H_{33}OH$	242	0,3253	0,1143	0,17
Жирные кислоты					
Муравьиная	$HCOOH$	46	0,6823	—	0,45
Уксусная	CH_3COOH	60	0,6003	—	0,40
Пропионовая	C_2H_5COOH	74	0,6387	—	0,31
Масляная	C_3H_7COOH	88	0,5721	—	—
Валериановая	C_4H_9COOH	102	0,5259	—	0,28
Капроновая	$C_5H_{11}COOH$	116	0,4654	0,3108	—
Энанговая	$C_6H_{13}COOH$	130	0,4051	0,2556	—
Каприловая	$C_7H_{15}COOH$	144	0,3417	0,2003	0,19
Каприновая	$C_8H_{17}COOH$	172	0,2006	0,0742	—
Лауриновая	$C_{11}H_{23}COOH$	200	0,0983	—	—

3. Для данной твердой поверхности при одном и том же молекулярном весе смазывающего вещества наибольшее значение коэффициента статического трения дают парафины, меньшее — спирты наименьшее — кислоты (см. рис. 15, относящийся к случаю трения стеклянных поверхностей). Это обстоятельство следует, очевидно, связать с неполярностью молекул парафинов и полярностью спиртов и жирных кислот. Численные данные, приведенные в табл. 17 относятся к случаю трения сферической поверхности о плоскую.

При трении двух плоских поверхностей коэффициент статического трения имеет обычно значительно большую величину; от

ченные выше закономерности остаются, однако, и в этом случае в силе. И в этом случае при данной нагрузке в координатах коэф-

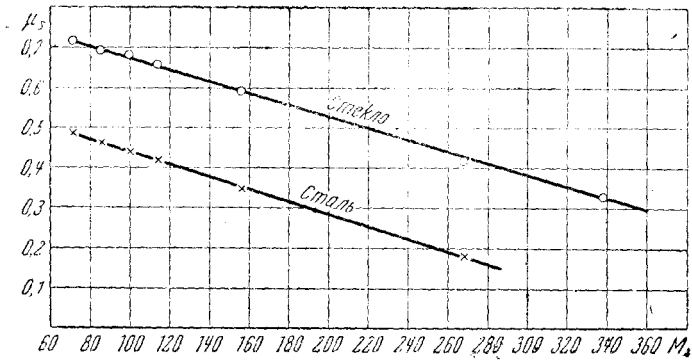


Рис. 12.

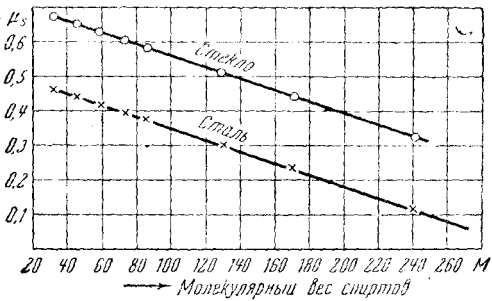


Рис. 13.

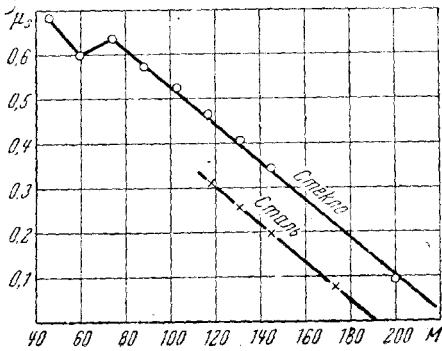


Рис. 14.

фициент трения — молекулярный вес получаем прямые линии; располагаются они в том же порядке.

По мере возрастания нагрузки коэффициент трения убывает; в пределе для плоских поверхностей получаем те же прямые, что и для трения сферической поверхности о плоскую.

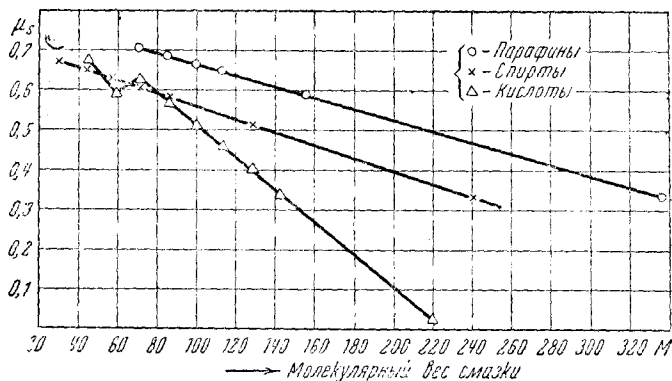


Рис. 15.

Глава IV. Кинетическое трение смазанных поверхностей

§ 19. Кинетическое трение в условиях „граничной“ смазки

Кинетическое трение некоторых твердых поверхностей в условиях „граничной“ смазки их парафинами, спиртами и жирными кислотами было изучено Биром и Боуденом¹⁵ с помощью прибора и методики, описанных нами подробно в § 7. При этом как уже было отмечено выше (§ 13), удалось наблюдать непосредственный переход от условий „полной“ смазки к условиям смазки „граничной“.

В начале опыта, при наличии на трущихся поверхностях тонкого слоя смазывающего вещества, коэффициент кинетического трения оказывается функцией скорости относительного движения поверхностей и вязкости смазки; он убывает с уменьшением скорости движения и возрастает при применении более вязких смазывающих веществ.

В процессе опыта осуществляется, однако, переход к условиям „граничной“ смазки, характеризующимся постоянным, не зависящим ни от вязкости смазывающего вещества, ни от скорости относительного движения тел значением коэффициента кинетического трения μ_k .

Для разных смазывающих веществ этот переход осуществляется при различных значениях давлений между поверхностями и различных скоростях их относительного движения. Для некоторых смазывающих веществ условия „полной“ смазки удается осуществлять лишь при скоростях движения, лежащих выше извест

минимума; для других (очень вязких) смазывающих веществ условия „полной“ смазки сохраняются, напротив, вплоть до очень малых скоростей относительного движения.

Как показали специальные исследования, при „граничной“ смазке коэффициент кинетического трения μ_k во всем исследованном интервале скоростей — от 600 до 5 см/сек — от скорости не зависит.

Снимаемые при этом кривые „замедления“ трущихся поверхностей оказываются строго прямолинейными (для сравнения см. кривую замедления рис. 9, отвечающую случаю перехода от условий „полной“ смазки к смазке „граничной“).

§ 20. Коэффициент кинетического трения и нагрузка

В отличие от случая статического трения при кинетическом трении твердых поверхностей характер зависимости коэффициента трения от величины нагрузки оказывается различным в зависимости от природы смазывающего вещества.

Бир и Бруден¹⁵ подразделяют смазывающие вещества на два класса. Для одного из них коэффициент кинетического трения при изменении нагрузки остается неизменным, т. е. оправдывается закон Амонтона. В случае трения стальных поверхностей к смазкам этого типа относятся, например, октан, тетрадекан, иодистый цетил, пальмитиновый этил и т. д.

Для смазок же второго типа коэффициент кинетического трения μ_k при возрастании нагрузки убывает, стремясь при этом к некоторому минимальному значению; закон Амонтона оказывается, таким образом, несправедливым. К смазкам второго типа относятся, по большей части, спирты и жирные кислоты.

Таблица 18

Нагрузка в г	Смазывающее вещество			
	октиловый спирт	каприловая кислота	олеиновая кислота	репное масло
	μ_k			
10,8	0,105	0,080	0,124	0,140
14,0	0,090	—	—	—
22,0	0,083	—	—	—
38,5	0,064	0,072	0,093	0,110
41,7	0,061	—	—	—
95,7	0,053	0,064	0,071	0,091

В табл. 18 и на рис. 16 приведены значения коэффициента кинетического трения μ_k стальных поверхностей при различных

нагрузках в условиях „граничной“ смазки некоторыми смазывающими веществами второго типа. Наименьшее значение μ_k , т. е. наилучшие условия смазки, при этом имеет место в случае октилового спирта ($\mu_k = 0,053$).

§ 21. Роль природы твердой поверхности

Исследование кинетического трения различных твердых поверхностей показало, что в зависимости от природы твердой поверхности одно и то же смазывающее вещество может относиться либо

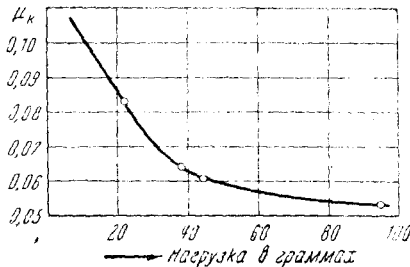


Рис. 16.

к первому, либо ко второму типу смазки, т. е. характер зависимости μ_k от нагрузки обуславливается не только природой смазывающего вещества, но и природой трущихся поверхностей.

Так например, при трении стеклянных поверхностей октиловый спирт и каприловая кислота, в противоположность случаю трения стальных поверхностей, при всех значениях на-

грузки дают постоянные значения μ_k (для октилового спирта $\mu_k = 0,259$, для каприловой кислоты $0,216$); для олеиновой же кислоты при увеличении нагрузки от 10,8 до 95,7 г μ_k понижается от 0,110 до 0,084; в случае трения никелевых поверхностей при смазывании октиловым спиртом μ_k с увеличением нагрузки понижается.

Для одного класса твердых поверхностей и смазывающих веществ закон Амонтона, таким образом, оправдывается, для другого же класса поверхностей и смазок коэффициент кинетического трения при увеличении нагрузки убывает.

В главе о статическом трении смазанных поверхностей (§ 15) мы пришли к заключению, что выполнимость или невыполнимость закона Амонтона связана лишь с величиной нормального давления между трущимися поверхностями. В случае кинетического трения картина оказывается более сложной. При ее рассмотрении следует повидимому, учитывать как изменение состояния пленок смазывающих веществ, так и возможные изменения состояния самих твердых поверхностей в процессе трения.

Что же касается зависимости коэффициента трения от упруги постоянных, отмеченной выше для случая статического трения ка „сухих“, так и смазанных поверхностей (§§ 5, 17), то приводимые Биром и Боуденом данные свидетельствуют о том, что в случае кинетического трения смазанных поверхностей эта зависимость остается в силе.

Для данного смазывающего вещества численное значение коэффициента кинетического трения стекла больше численного значе-

коэффициента μ_k для никеля; последний же превышает коэффициент кинетического трения стальных поверхностей.

В случае кинетического трения разнородных смазанных поверхностей A о вещество B , как и в случае статического трения, имеет значение, промежуточное между коэффициентами трения пар однородных поверхностей:

$$(\mu_k)_{AA} < (\mu_k)_{AB} < (\mu_k)_{BB}.$$

При этом, однако, как и в случае кинетического трения „сухих“ поверхностей, величина коэффициента $(\mu_k)_{AB}$ оказывается различной в зависимости от того, из какого материала меньшая, из какого — большая из трущихся поверхностей. Так например, в случае смазки октиловым спиртом и гексадеканом коэффициент кинетического трения стеклянных шариков о стальную поверхность больше коэффициента кинетического трения стальных шариков о стеклянную поверхность; трение никелевых шариков о стальную поверхность дает большее значение μ_k , нежели трение стальных шариков о никелевую поверхность и т. д.

Это дает нам основание предполагать, что и в этом случае процесс трения сопровождается полировкой одной из трущихся поверхностей.

§ 22. Роль химической природы смазывающего вещества

На рис. 17, 18 и 19 приведены кривые зависимости коэффициента кинетического трения μ_k от молекулярного веса смазываю-

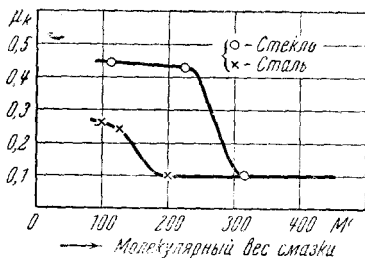


Рис. 17.

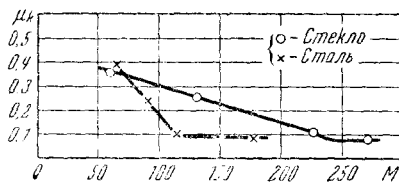


Рис. 18.

щего вещества M для случая трения стальных и стеклянных поверхностей, смазанных парафинами, спиртами и жирными кислотами¹⁵. Они свидетельствуют о том, что как и в случае статического трения (§ 18) коэффициент μ_k убывает при возрастании молекулярного веса смазывающего вещества. Характер зависимости μ_k от M оказывается, однако, в этом случае значительно более ложным,

Таблица 19

Смазка	Длина углеродной цепи, отвечающей $(\mu_k)_{\min}$		$(\mu_k)_{\min}$	
	стеклянная поверхность	стальная поверхность	стеклянная поверхность	стальная поверхность
Парафины .	C_{22}	C_{14}	0,099	0,098
Спирты . .	C_{16}	C_9	0,079	0,053
Кислоты . .	C_{11}	C_6	0,104	0,063

В случае каждого из гомологических рядов (парафинов, спиртов, жирных кислот) при увеличении M достигается некоторое минимальное значение μ_k , после чего при дальнейшем увеличении M μ_k от M не зависит. Как это следует из табл. 19, длина углеродной цепи, при которой μ_k достигает своего минимального значения, оказывается различной для разных смазок и разных твердых поверхностей.

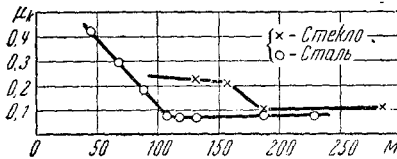


Рис. 19.

Для данной твердой поверхности наименьшее значение μ_k дают спирты.

ГЛАВА V. ТЕОРИИ ТРЕНИЯ

§ 23. Теории трения

Одной из первых количественных теорий трения смазанных поверхностей явилась теория Рейнольдса²³, дополненная впоследствии Зоммерфельдом²⁴. Эта теория основывается на чисто гидродинамических представлениях о слое смазывающего вещества, рассматривая его как вязкую среду. Природа самих твердых поверхностей при этом игнорируется. Не останавливаясь на подробном изложении и критике подобной точки зрения, мы отметим лишь что она представляет практический интерес только в том случае когда толщина смазывающего слоя настолько велика, что он может быть рассматриваем как жидкий, т. е. лишь в условиях „полной“ („совершенной“) смазки.

В условиях же „границной“ смазки (а равно и при „сухом трении“), как об этом свидетельствует вся совокупность приведенных выше опытных фактов, основную роль играют физические процессы, разыгрывающиеся на границе раздела твердых поверхностей.

Коэффициент трения от вязкости смазывающего вещества при этом не зависит, да и само понятие вязкости утрачивает свой обычный смысл; состояние тонкого ориентированного слоя смазки можно было бы квалифицировать как „твердое“¹⁾).

Гидродинамическая теория Зоммерфельда — Рейнольдса в этом случае совершенно не применима.

Теория „сухого“ трения и трения в условиях „граничной“ смазки прежде всего должна быть основана на учете сил взаимодействия между молекулами твердых поверхностей и молекулами адсорбированных на них пленок посторонних веществ, а также должна учитывать эффект ориентации молекул смазывающего слоя.

Имеется, однако, весьма небольшое число попыток создания подобной теории. Из них наибольший интерес представляют работы Дерягина²⁵ и Томлинсона⁶. Обе они, однако, не свободны от ряда недочетов и нуждаются в дальнейшем усовершенствовании.

§ 24. Теория Дерягина

В опубликованной в 1934 г. статье „Молекулярная теория трения и скольжения“ Дерягин²⁵ ставит основной своей задачей доказательство эмпирического закона Амонтона.

С этой целью он рассматривает относительное скольжение двух кристаллических плоскостей, основываясь на механической модели „пилы“. Силами притяжения между молекулами скользящих поверхностей он при этом намеренно пренебрегает, полагая их отсутствие необходимой предпосылкой выполнения закона Амонтона. Наличие же сил отталкивания Дерягин учитывает наложением жестких связей на координаты, определяющие конфигурации молекул трущихся поверхностей. В результате рассмотрения условий механического равновесия скользящих плоскостей Дерягину действительно удается получить закон Амонтона

$$P = \mu F.$$

Предложенная им теория носит, однако, весьма формальный характер, не расшифровывая физической природы всей сложной совокупности явлений, сопровождающих трение твердых поверхностей.

Основной ее недостаток, как нам кажется, заключается в отказе от учета сил притяжения. Закон Амонтона действительно, как это полагает Дерягин, выполняется только при наличии на твердых поверхностях каких-либо посторонних покрытий — смазывающих веществ или адсорбированных газовых пленок. Это еще, однако, ни в коей степени не означает „выхода из игры“ сил молекулярного притяжения.

¹⁾ Об этом непосредственно свидетельствует возможность успешного применения твердых смазывающих веществ, отмечаемая многими авто-рами.

Если бы это было так, то природа самих твердых поверхностей на величину коэффициента трения не оказала бы никакого влияния, последний полностью определялся бы свойствами смазывающего вещества. Мы знаем, однако, что такие условия имеют место только при так называемой „полной“ или „совершенной“ смазке, к которой теория Дерягина опять-таки применена быть не может.

Вся совокупность изложенных выше фактов, в частности существенная роль адсорбированных на поверхностях пленок в случае „сухого“ трения, влияние степени ориентации молекул смазывающего слоя при трении в условиях „граничной“ смазки, зависимость коэффициента статического трения от упругих постоянных трущихся тел, сохраняющаяся также и в случае трения смазанных поверхностей, — все это с несомненностью свидетельствует о значительной роли сил сцепления между самими твердыми поверхностями и о необходимости их учета при построении последовательной молекулярной теории трения.

Прилагая полученные им результаты к явлениям скольжения в монокристаллах, Дерягин приходит к заключению о наличии связи между пластичностью твердых тел и коэффициентами статического трения; при этом наиболее пластичными, по его мнению, являются те кристаллы, для которых коэффициент статического трения μ_s имеет наименьшее значение.

Сопоставление опытных данных о пластичности и статическом трении некоторых твердых тел показывает, что связь между пластичными свойствами твердых тел и коэффициентами статического трения действительно имеется; она оказывается, однако, обратной той связи, наличие которой предполагает Дерягин ¹⁾.

§ 25. Теория Томлинсона

а. Трение скольжения

Опубликованная в 1929 г. теория трения Томлинсона ⁶ и по сию пору является почти единственной „молекулярной“ теорией трения. Несмотря на ряд недостатков, она приводит к установлению некоторых весьма существенных и подтверждающихся на опыте соотношений. Мы остановимся поэтому подробно на ее изложении.

Необходимо отметить, что ко времени создания этой теории физики располагали весьма скудными данными о характере сил молекулярного взаимодействия; это обстоятельство сказалось, однако, лишь на внешнем оформлении теории, не отразившись на ее принципиальных положениях.

Контакт между трущимися телами Томлинсон трактует как контакт между отдельными парами молекул этих тел. Прилагаемая

¹⁾ Подробнее об этом см. в § 26 этой статьи.

к телам нормальная нагрузка F уравнивается силами молекулярного отталкивания

$$F = n\bar{p}, \quad (1)$$

где n — число пар молекул, находящихся в контакте, \bar{p} — среднее значение силы отталкивания такой пары. Последнее полагается при этом независимым от F .

Согласно Томлинсону, процесс трения представляет собой последовательный отрыв находящихся в контакте молекул друг от друга и возникновение новых молекулярных контактов. При этом работа внешней силы P на пути x

$$Px = NW, \quad (2)$$

где W — средняя энергия отрывания друг от друга пары молекул, образующих контакт, N — число таких „отрываний“ на пути x . При наличии n молекулярных контактов N равно $\frac{nx}{e}$, где e — постоянная решетки, или на основании соотношений (1) и (2)

$$N = \frac{F}{pe} x$$

и

$$P = \frac{W}{pe} F. \quad (3)$$

Согласно закону Амонтона, внешняя сила

$$P = \mu F, \quad (4)$$

откуда коэффициент трения

$$\mu = \frac{W}{pe}. \quad (5)$$

Все входящие в это соотношение величины — W , \bar{p} и e — являются молекулярными постоянными; молекулярные постоянные, — заключает Томлинсон, — связаны с упругими постоянными данного тела, откуда следует, что коэффициент трения должен быть связан с упругими постоянными тела.

Это заключение Томлинсона, как мы знаем, оправдывается на опыте (§ 5).

Количественное соотношение между μ и упругими постоянными Томлинсон устанавливает с помощью теории упругого контакта, развитой Герцем. Согласно Герцу, площадь упругого контакта a между телами A и B пропорциональна величине

$$F^{\frac{2}{3}} (\vartheta_A + \vartheta_B)^{\frac{2}{3}},$$

где F — нормальная нагрузка, а ϑ — функция упругих постоянных,

связанная с модулем сжимаемости K и модулем сдвига g соотношением

$$\vartheta = \frac{3K + 4g}{g(3K + g)}. \quad (6)$$

Томлинсон полагает, что число пар молекул, находящихся в контакте n , должно быть некоторой функцией величины площади упругого контакта

$$n = f(x),$$

откуда, согласно соотношениям (1) и (5)

$$\mu = \frac{W}{eF} n = \frac{W}{eF} f(x). \quad (7)$$

В дальнейшем Томлинсон считает F постоянной величиной и определяет характер зависимости μ от $(\vartheta_A + \vartheta_B)$ на основании экспериментальных данных. Для измеренных им коэффициентов статического трения 55 различных пар твердых поверхностей отношение $\frac{(\vartheta_A + \vartheta_B)^2}{\mu}$ оказалось постоянной величиной, т. е.

$$\mu \sim (\vartheta_A + \vartheta_B)^{\frac{2}{3}}. \quad (8)$$

Таблица 20

Значения $\left(\frac{\vartheta_A + \vartheta_B}{\mu}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot 10^8$ по Томлинсону

Материал поверхности	Твердая сталь	Мягкая сталь	Платина	Никель	Медь	Латунь	Алюминий	Стекло	Олово	Свинец
Твердая сталь	5,55	5,47	5,97	5,32	5,20	5,71	5,38	6,12	5,19	5,23
Мягкая . . .	5,47	5,64	5,69	5,44	5,43	6,14	5,80	5,20	5,20	5,36
Платина . . .	5,97	5,69	5,70	6,29	5,9	5,73	4,58	5,56	4,94	5,02
Никель . . .	5,32	5,44	6,29	6,03	5,18	6,19	4,81	4,85	4,63	4,81
Медь	5,20	5,43	5,09	5,18	5,70	5,88	5,80	6,24	5,35	5,44
Латунь . . .	5,71	6,14	5,73	6,19	5,88	6,02	5,98	5,03	6,02	5,10
Алюминий . .	5,38	5,89	4,58	4,81	5,80	5,98	4,94	5,65	5,65	5,51
Стекло	6,12	5,20	5,56	4,85	6,24	5,03	5,65	5,24	5,61	4,60
Олово	4,19	5,29	4,94	4,63	5,35	6,02	5,65	5,61	5,06	5,10
Свинец	5,23	5,36	5,02	4,81	5,44	5,10	5,51	4,60	5,10	4,78

В табл. 20 приведены значения $\frac{(\vartheta_A + \vartheta_B)^2}{\mu}$, вычисленные Томлинсоном. Среднее значение этого отношения составляет $5,47 \cdot 10^8$, сорок две из приведенных в таблице цифр отклоняются от сред-

него значения в пределах 10⁰/0. Эти небольшие отклонения являются вполне естественными, так как коэффициент пропорциональности между μ и $(\vartheta_A + \vartheta_B)^{\frac{2}{3}}$ зависит от отношения $\frac{W}{e}$, различного для разных пар веществ.

Соотношение (8) находится в полном согласии с отмеченной выше связью коэффициента трения однородных поверхностей с упругими константами данного тела: в случае трения однородных поверхностей [формула (6)]:

$$\mu \sim \left[\frac{3K + 4g}{g(3K + g)} \right]^{\frac{2}{3}}, \quad (9)$$

т. е. коэффициент трения должен убывать по мере возрастания модуля сдвига g .

Соотношение (8) объясняет также, почему в случае трения разнородных поверхностей коэффициент трения имеет значение, промежуточное между коэффициентами трения пар однородных поверхностей.

В объяснении этих наблюдающихся на опыте закономерностей — большая заслуга теории Томлинсона.

Томлинсон упустил, однако, из виду следующее чрезвычайно существенное обстоятельство. Соотношение (8) означает, что коэффициент трения μ прямо пропорционален величине площади контакта α , но последняя содержит множитель $F^{\frac{2}{3}}$, опущенный Томлинсоном при расчетах.

Подставляя значение α в формулу (7), получаем

$$\mu \sim \frac{W}{e} \frac{F^{\frac{2}{3}}}{F} (\vartheta_A + \vartheta_B)^{\frac{2}{3}},$$

т. е.

$$\mu \sim \frac{1}{\sqrt[3]{F}}. \quad (10)$$

Это соотношение мы будем в дальнейшем называть законом Томлинсона.

Применение теории упругого контакта приводит, таким образом, к противоречию с законом Амонтона (4): коэффициент трения μ , полагаемый обычно постоянным, сам оказывается функцией нормальной нагрузки F .

На возможной интерпретации этого, на первый взгляд парадоксального результата мы остановимся подробно в одном из следующих параграфов.

б. Соотношение между коэффициентами трения скольжения и катания

Томлинсон устанавливает также соотношение между коэффициентом трения скольжения μ и коэффициентом трения катания λ и подвергает его опытной проверке.

Трение катания точно так же, как и трение скольжения, Томлинсон описывает как последовательный контакт пар молекул трущихся тел с последующим отрывом их друг от друга.

Если цилиндр радиуса r длины b катится по плоскости под влиянием внешней силы, то работа этой силы на пути x определяется приведенным выше соотношением (2)

$$Px = NW,$$

где N и W имеют прежний смысл. Сила P связана с нагрузкой F , приходящейся на единицу длины цилиндра, соотношением

$$P = \lambda F, \quad (11)$$

где λ — коэффициент трения катания, а число последовательно отрывающихся друг от друга пар молекул на пути x в этом случае, как легко показать, равняется

$$N = \frac{3}{4} \frac{nx}{a} = \frac{3}{4} \frac{F}{pa} x, \quad (12)$$

где a — половина ширины площади контакта между цилиндром и плоскостью. Соотношения (2), (11) и (12) дают

$$\lambda = \frac{3}{4} \frac{W}{aP}. \quad (13)$$

С помощью формулы (5) находим соотношение между коэффициентом трения катания λ и коэффициентом трения скольжения μ :

$$\frac{\lambda}{\mu} = \frac{3}{4} \frac{e}{a}. \quad (14)$$

Величина a может быть определена с помощью формулы Герца для упругого контакта между цилиндром и плоскостью:

$$a^2 = \frac{1}{\pi} Fr (\vartheta_A + \vartheta_B), \quad (15)$$

где r — радиус цилиндра.

Томлинсон подвергает соотношение (14) опытной проверке, определяя λ экспериментально для случая катания стального цилиндра по стальной плоскости.

Уравнение (15) в этом случае дает $a = 4 \cdot 10^{-4}$ см, в качестве e Томлинсон берет постоянную решетку железа $2,8 \cdot 10^{-8}$ см. Под-

становка в формулу (14) значения μ_s для стали, приводимого Гарди $\mu_s = 0,79$, дает

$$\lambda = 0,000041.$$

Полагая $\mu = 0,39$ (по Томлинсону), получаем

$$\lambda = 0,000020.$$

Экспериментальное значение λ

$$\lambda = 0,000044.$$

Ввиду большого разброса значений μ_s , определенных для разных сортов стали при разных условиях опыта, это совпадение можно считать вполне удовлетворительным.

§ 26. К вопросу о механизме трения

Мы установили, что как в случае смазанных, так и в случае „сухих“ поверхностей при малых значениях нормального давления коэффициент статического трения с увеличением давления убывает,¹⁾ т. е. имеют место отклонения от закона Амонтона. Начиная с некоторого значения нагрузки, дальнейшее убывание коэффициента трения прекращается, и вступает в силу закон Амонтона.

Вплоть до настоящего времени теоретическое объяснение этих основных закономерностей отсутствует; причины, обуславливающие справедливость закона Амонтона, остаются неясными так же, как и причины, вызывающие отклонения от этого закона.

Мы попытаемся наметить здесь возможные пути объяснения наблюдающихся закономерностей. Прежде всего, как нам кажется, следует внести ясность в вопрос о характере контакта между трущимися поверхностями.

Можно думать, что при малых значениях давления между поверхностями, контакт между ними является упругим. Именно к этому случаю должна относиться изложенная выше теория Томлинсона. Эта теория, как уже упоминалось, приводит к противоречиям с законом Амонтона, устанавливая обратную пропорциональность между коэффициентом трения и кубическим корнем из нормального давления [формула (10) § 25]:

$$\mu \sim \frac{1}{\sqrt[3]{F}}.$$

Как показал наш подсчет для кривой зависимости μ от F , приведенной на рис. 16, произведение $\mu \sqrt[3]{F}$ действительно остается постоянным.

Закономерности, наблюдающиеся при малых давлениях, можно, таким образом, попытаться объяснить упругим характером контакта между трущимися поверхностями, обуславливающими справедливость закона Томлинсона (10).

¹⁾ См. § 15 и примечание к нему, а также § 20 и 21.

При больших давлениях вступает, однако, в силу закон Амонта. Его толкование встречает значительно большие трудности, нежели объяснение отклонений от него. Естественно предположить, что при увеличении давления меняется характер контакта между твердыми поверхностями. Можно думать, что это изменение заключается в том, что при больших давлениях контакт между твердыми поверхностями приобретает пластический характер. Трение тел друг о друга в этом случае может сопровождаться течением поверхностных слоев самого вещества.

Для проверки возможности такой точки зрения весьма существенны следующие соображения. Зависимость коэффициентов статического трения от упругих констант твердых тел, отмеченная выше, наблюдается как при низких, так и при высоких давлениях. Предположение о пластическом характере контакта может быть согласовано с этим обстоятельством только при условии наличия определенного соответствия между упругими и пластическими свойствами твердых тел.

Сопоставление пластичности ряда твердых тел с упругими постоянными этих тел показывает, что такое соответствие действительно имеется. Расположив металлы в порядке возрастающей пластичности ¹⁾ (см. кривые упрочнения у Боас и Шмид ²⁶⁾

Fe, Ni, Cu, Ag, Al, Au, Mg, Zn, Sn, Cd,

мы приходим к заключению, что они расположены при этом в порядке убывания упругих постоянных и, следовательно, в порядке возрастания коэффициентов статического трения (для сравнения см. табл. 3 и 5).

Отсюда следует, что чем пластичнее тело, тем больше его коэффициент статического трения.

С вопросом о характере контакта между твердыми телами тесно связан также вопрос о местонахождении плоскости скольжения тел друг относительно друга. В случае упругого контакта она лежит повидимому, на границе раздела твердых тел между адсорбированными на поверхностях пленками. В случае пластичного контакта она может находиться также и внутри одного из твердых тел, а именно — внутри более пластичного тела. В этом случае в результате трения на менее пластичной поверхности должно оставаться слой второго вещества. С такими случаями мы встречаемся на каждом шагу в повседневной практике — следы карандаша на бумаге, мела на доске и т. д.

Весьма существенную роль должно также играть то обстоятельство, что в результате выжимания смазывающего вещества из адсорбированных пленок (при „сухом“ трении) из пространства между твердыми поверхностями на последних могут появляться участки непосредственного „прилипания“ („химического“ контакт твердых тел друг к другу.

¹⁾ Эти данные любезно сообщены мне М. В. Классен-Неклюдовой.

О наличии такого „прилипания“ свидетельствуют описанные выше опыты по изучению „сухого“ трения в вакууме (§ 3), в частности то обстоятельство, что в вакууме коэффициент трения разнородных поверхностей зависит от сродства между твердыми телами.

Не доказано, конечно, что наличие пластичного контакта могло бы обусловить выполнение закона Амонтона; не вполне ясна также роль „химического“ контакта и тех изменений рельефа поверхностей, которые могут иметь место при трении.

Выяснение этих вопросов должно явиться предметом специальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Amon-ton, Histoire de l'Academie Royale des Sciences avec les memoires de mathématique et de physique, 1699.
2. Cou-lomb, Memoires de mathématique et de physique de l'Academie Royale, 1785.
3. W. Hardy a. I. Hardy, Phil. Mag., **38**, 32, 1919.
4. I. Lang-muir, Journ. Frankl. Inst., **218**, 143, 1934.
5. W. Hardy a. I. Doubleday, Proc. Roy. Soc., **A 100**, 550, 1921.
6. Tomlinson, Phil. Mag., **7**, 905, 1929.
7. Jacob, Ann. d. Physik, **38**, 126, 1912.
8. Dow, Phys. Rev., **33**, 252, 1929.
9. P. Shaw a. E. Leavey, Phil. Mag., **10**, 809, 1930.
10. Holm u. Kirschstein, Wiss. Veröf. Siemens-Konzern, **XV**, 1, 122, 1936.
11. W. Hardy a. I. Doubleday, Proc. Roy. Soc., **A 101**, 487, 1922.
12. Honda a. Jamada, Journ. Inst. Metals, **1**, 49, 1925.
13. Galton a. Westinghouse, Engineering, **26**, 153, 1878.
14. Archbutt a. Deeley, Lubrication and lubricants, 1927.
15. Beare a. Bowden, Phil. Trans., **A 234**, 329, 1934.
16. Bowden a. Ridler, Proc. Roy. Soc., **A 154**, 640, 1936.
17. Macaulay, Nature, **118**, 339, 1926.
18. Bowden a. Hughes, Nature, **139**, 152, 1937.
19. W. Hardy a. I. Doubleday, Proc. Roy. Soc., **A 104**, 25, 1923.
20. W. Hardy a. I. Bircumshaw, Proc. Roy. Soc., **A 108**, 1, 1925.
21. Doubleday, Proc. Roy. Soc., **A 106**, 341, 1924.
22. Б. Дерягин, Журнал физич. химии, **4**, 803, 1933.
23. Reynolds, Phil. Trans., **177**, 157, 1886.
24. A. Sommerfeld, Z. Math. Phys., **50**, 97, 1904.
25. Б. Дерягин, Журнал физич. химии, **5**, 1165, 1934.
26. Boas u. Schmid, Kristallplastizität, Berlin 1935.