

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ КОНТАКТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

И. Р. КОНЯХИН

### Трение покоя

Согласно опытам Кулона—Амонтона сила трения пропорциональна нормальному давлению:

$$P = \mu N,$$

здесь  $\mu$ —коэффициент трения покоя;

отсюда

$$\mu = \frac{P}{N}.$$

Для данной пары поверхностей коэффициент трения—величина постоянная.

Существует мнение, что коэффициент трения зависит непосредственно от величины выступов шероховатостей. Нами выяснено, что величина этих выступов или неровностей в трении покоя играет значительную роль, но нельзя сказать того, что неровности имеют непосредственное влияние на величину силы трения; чем больше шероховатости, тем больше и сила трения. Правда, иногда это именно так, но бывают случаи, когда дело обстоит иначе.

Нами был проделан такой опыт. Сначала был определен коэффициент трения шлифованных поверхностей. После этого поверхности были обработаны грубой наждачной шкуркой. Коэффициент трения покоя при этом не изменился. Из этого можно заключить, что, конечно, шероховатости имеют значение, но не прямое, а косвенное.

### Влияние на коэффициент трения покоя удельного давления

По закону Кулона—Амонтона сила трения не зависит от удельного давления. Это положение будет верным только при определенных условиях, а именно, если удельное давление невелико.

При подсчете удельного давления можно брать номинальную площадь, тогда

$$P = \frac{N}{F_{ном}}.$$

По этой формуле получается сильно заниженное удельное давление. Действительная площадь контакта значительно меньше. Контактная площадь образуется благодаря деформации неровностей. Деформируясь пластически, они увеличивают площадь контакта до тех пор, пока не наступает равновесное состояние. Когда закончится пластическая деформация их при данном нормальном давлении, тогда и будет иметь место наибольшая контактная площадь, которая лимитируется очевидно пределом текучести

$$F_k = \frac{N}{\sigma_s}.$$

В наших опытах  $F_n = 1,4 \text{ см}^2$ . Если принять для стали предел текучести  $\sigma_s = 2000 \text{ кг/см}^2$ , то при  $N = 24,4 \text{ кг}$

$$F_k = \frac{24,4}{2000} = 0,012 \text{ см}^2 = 1,2 \text{ мм}^2.$$

После опыта с трением в микроскоп можно видеть сглаженные места, то есть те точки, в которых происходило действительное касание. Площадь этих сглаженных пятен имеет величину того же порядка, что и вычисленная по формуле, но только в том случае, если произведено притирание поверхностей под нагрузкой, без притирания площади контакта получают меньше.

Неровности контакта деформируются в нормальном направлении по-разному: одни в пределах упругости, другие за пределами ее, так что истинная площадь контакта состоит как бы из двух площадей: площади упруго-деформированных неровностей и площади пластически-деформированных неровностей

$$F_k = F_y + F_n.$$

Если номинальное удельное давление невелико, то превалирует упругая площадь контакта, так как пластически деформировано пока незначительное число неровностей.

При малых удельных давлениях, действительно, как показывают опыты, коэффициент трения покоя сохраняет свою величину и трение следует закону Кулона.

Можно, таким образом, сделать заключение, что для поверхностей, находящихся в пределах упругости, сила трения пропорциональна нормальному давлению. При возрастании пластической площади контакта коэффициент трения растет. В частности, этим объясняется увеличение коэффициента трения покоя в зависимости от времени предварительного контакта; пластическая деформация неровностей в нормальном направлении происходит во времени, следовательно, таким же образом растет и контактная площадь, что ведет за собой повышение силы трения.

#### Зависимость коэффициента трения покоя от быстроты нарастания сдвигающей силы

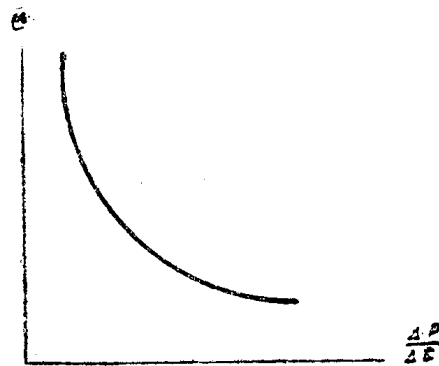
Во время наших опытов с трением покоя было выяснено, что коэффициент трения зависит от самой сдвигающей силы, а именно, от ее нарастания во времени.

Если силу  $P$  приложить к сдвигаемому телу не сразу, а постепенно наращивая ее от нуля до максимума, при этом очень медленно, то тело сдвинется тогда, когда сила  $P$  достигнет наибольшей величины  $P_{max}$ . В этом случае

$$\mu = \frac{P_{max}}{N}$$

Если же силу  $P$  увеличивать быстрее, то тело сдвинется с места раньше, чем будет достигнута  $P_{max}$ , то есть при меньшем коэффициенте трения.

Ниже показана зависимость коэффициента трения покоя от быстроты нарастания сдвигающей силы (фиг. 1).

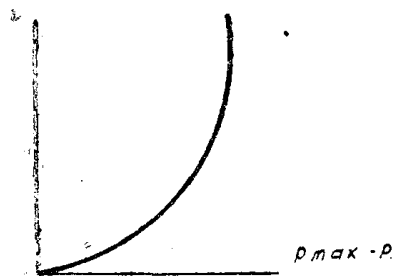


Фиг. 1

Уменьшение коэффициента трения происходит по кривой, напоминающей гиперболу.

### Явление временного покоя

Для страгивания с места, как мы видели, не обязательно, чтобы сдвигающая сила имела величину  $P_{max}$ . Можно произвести страгивание с места силой  $P < P_{max}$ . При этом, если сила  $P$  мало отличается от  $P_{max}$ , то сдвиг произойдет, но не сразу, а по истечении некоторого времени. Следовательно, тело может находиться в покое временно. Это и будет состояние временного покоя. Чем больше разность  $P_{max} - P$ , тем больше и продолжительность временного покоя.



Фиг. 2

При силе  $P = P_{max}$  продолжительность временного покоя равна нулю. Это явление резко выявляется при больших удельных давлениях.

На фиг. 2 показана зависимость продолжительности временного покоя от разности сил  $P_{max} - P$ .

При некотором значении  $\Delta P = \Delta P_0$  сдвига не происходит.  $\Delta P = P_{max} - P$  можно подобрать близкой к наибольшей силе постоянного покоя. В этом случае поверхности еще не сдвигаются. Если при таких условиях выдерживать образцы в течение большого промежутка времени, то коэффициент трения увеличивается.

В наших опытах трущаяся поверхность представляла из себя плоское кольцо наружного диаметра  $D = 22$  мм и внутреннего  $d = 18$  мм.

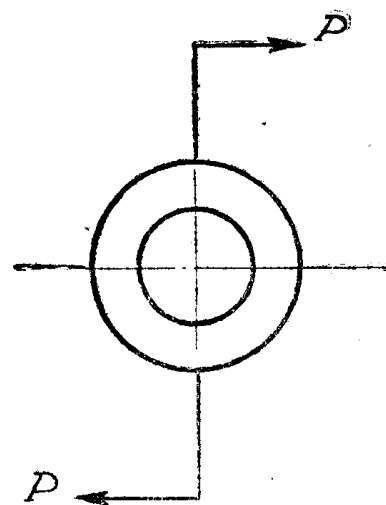
### Увеличение коэффициента трения покоя при помощи многократных срывов

Максимальная пара сил производит срыв сцепления контакта, то есть быстрый переход от покоя к движению. После срыва, например, по часовой стрелке и последующей остановки поверхность может быть смещена в ту же сторону труднее, в обратную же сторону легче. В последнем случае сила срыва так же велика, как и раньше, то есть при срыве по часовой стрелке. Каждая перемена направления срыва повышает коэффициент трения. Чем больше число таких срывов, тем больше коэффициент трения. Но коэффициент трения не может быть таким способом увеличен до какой угодно величины, наступает предел насыщения.

Нами был произведен опыт с контактом чугуна по чугуну. Свежие, еще не работавшие поверхности имели коэффициент трения  $\mu = 0,17$ . После 100 быстрых срывов коэффициент трения увеличился до  $\mu = 0,36$  и после дополнительных 30 срывов — до  $\mu = 0,42$ . После этого дополнительные срывы уже не дали увеличения коэффициента трения — произошло насыщение.

Нужно заметить, что увеличенный таким способом коэффициент трения не является устойчивым.

В только что описанном опыте коэффициент трения был доведен до величины  $\mu = 0,42$ , но по истечении 20 часов он оказался уже  $\mu = 0,28$ ,

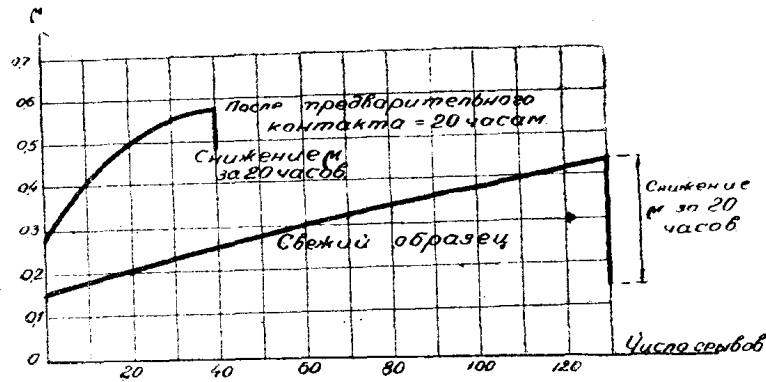


Фиг. 3

т. е. снизился, но зато теперь удалось его увеличить еще больше: после 20 срывов он возрос до  $\mu = 0,57$ . Результаты этого опыта представлены графиком (фиг. 4).

На графике видно, что свежий образец увеличивает коэффициент трения менее интенсивно, чем образец, уже бывший в работе и находившийся долго под действием нормального давления.

Во втором опыте после 20 часов под нагрузкой  $N$  коэффициент трения снизился до  $\mu = 0,49$ . Снижение коэффициента трения при  $N = 0$  идет зна-



Фиг. 4

чительно быстрее. В последнем опыте после снятия нормального давления коэффициент трения снизился за 5 минут с  $\mu = 0,49$  до  $\mu = 0,31$ .

Достигнутый в предыдущем опыте коэффициент трения вообще не является наибольшим. Контакт чугун по чугуну может дать коэффициент трения значительно выше. Нами производились опыты над увеличением коэффициента трения некоторых материалов и насыщение  $\mu$  было различным.

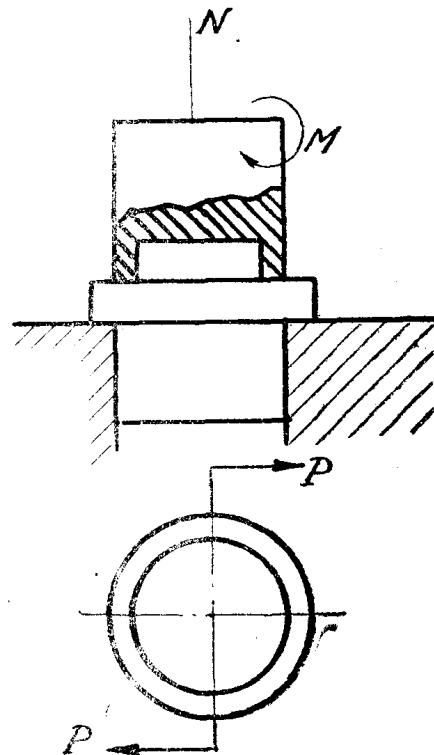
Например, контакт сталь по стеклу не дает увеличения:  $\mu = 0,08$ ,  $\mu_n = 0,08$ , то есть приращения  $\mu$  — нет.

Сталь—чугун  $\mu = 0,12$ ,  $\mu_n = 0,74$ , увеличение в 6,7 раза. Сталь по стали  $\mu = 0,12$ ,  $\mu_n = 0,96$ , то есть увеличение в 8 раз. Медь по меди  $\mu = 0,12$ ,  $\mu_n = 1$ , увеличение в 9 раз.

После такого опыта иногда на поверхности контакта образуется задира. Если колебания при срывах делать очень малой амплитуды, то задира не обнаруживается. Очевидно, здесь имеет влияние скорость движения во время срыва. Поверхностный слой разрушается благодаря усталости, давая мелкие частицы в виде чешуек, которые обнаруживаются при помощи микроскопа. Размеры чешуек доходят до 0,1 мм в ширину и длину. Толщину их определить пока не удалось, так как применялся микроскоп Бринеля с увеличением в 20 раз.

### Упругие свойства контакта

Упругие свойства контакта были исследованы на образцах с кольцевой контактной



Фиг. 5

поверхностью, круговое смещение вызывалось парой сил, приложенной к верхнему образцу. Опыты проводились на специально сконструированном приборе, дающем видимое увеличение смещения 50000 и в 250000 раз.

Величина смещения имеет порядок долей микрона. За единицу силы принят 1 кг, за единицу смещения  $10^{-6}$  см. При таких малых смещениях, очевидно, нет разницы в том, кольцевая ли это поверхность или прямая полоса, поэтому для простоты изложения будем рассматривать поступательное смещение тела.

### Упругое смещение

Под действием силы  $P$  образец смещается в сторону действия силы  $P$  на определенную микроскопически малую величину, и чем больше сила, тем больше и смещение. Зависимость смещения от сдвигающей силы исследовалась на контактах различных материалов. Выявлено, что в касательном направлении контакт обладает упругими свойствами; если образец сместить на небольшую величину, измеряемую долями микрона, то после удаления смещающей силы  $P$  он возвращается обратно. При этом в начале движения смещение происходит по линейному закону:  $P = KS$ , где  $S$ —величина смещения,  $K$ —коэффициент пропорциональности, который в дальнейшем будем называть коэффициентом упругости.

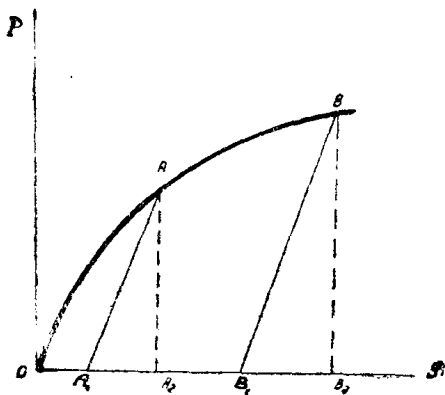
Смещение силой  $P$ , вообще говоря, происходит в два приема. Образец под действием этой силы сразу сдвигается вперед на определенную величину, после чего продолжает медленное движение и останавливается.

Удаление силы  $P$  вызывает обратное движение, которое также происходит в два приема: сначала быстрое смещение назад и затем медленное движение до остановки. Иначе говоря, контакт обладает свойством упругого последствия, которое можно наблюдать при механическом испытании металлов.

Величина смещения также зависит от того, смещается ли образец из состояния покоя или же из состояния незакончившегося движения во время упругого последствия, во втором случае величина смещения будет большей.

### Смещение при помощи медленно нарастающей движущей силы

Медленно нарастающая сила  $P$  дает смещение, происходящее по кривой  $OAB$ . Сдвигающая сила растет не пропорционально смещению. При достижении силы  $P$  значения  $P_{max}$ , рост ее прекращается и при этой силе, сохраняющей постоянное значение, смещение идет равномерно с постоянной скоростью. Дальнейшее увеличение силы вызывает ускоренное движение и затем срыв, то есть переход микродвижения на обычное.



Фиг. 6

Уменьшение же этой силы на незначительную величину приводит к замедленному движению и остановке. Вообще говоря, равномерного движения достичь не удастся. Под равномерным движением здесь следует понимать движение с очень малым замедлением. После остановки можно движущую силу удалить, удаление ее при этом сопровождается обратным смещением, но теперь уже по линейному

закону, на графике (фиг. 6) это показано прямой  $BB_1$  или, если не была достигнута сила  $P_{max}$ —по прямой  $AA_1$ .

В данном случае происходит чисто упругое смещение. Если теперь снова увеличивать силу  $P$ , то смещение идет по той же прямой  $AA_1$  или  $BB_1$ , по которой произошла разгрузка.

### Коэффициент упругости

Упругие свойства контакта можно характеризовать отношением  $K = \frac{BB_2}{B_1B_2}$  (фиг. 6), но  $BB_2$  — это упругая сила  $P_y$ , величина же  $B_1B_2$  — обратное упругое смещение.

Ввиду линейности упругого смещения  $K = \frac{P_y}{S_y}$ ; здесь  $S_y$  — величина упругого смещения.

Такое смещение, как показано на графике фиг. 6, можно производить порциями: то есть сначала сделать смещение по кривой  $OA_1$ . Снятие нагрузки  $P$  вызовет обратное движение по  $A_1A$ , получится  $S_y = A_1A_2$ . После этого снова можно произвести смещение вперед, которое теперь пойдет сначала по прямой  $A_1A$ , затем дальше по кривой  $AB$ . После этого производим спуск по прямой  $BB_1$ , что дает  $S_{y2} = B_1B_2$ .

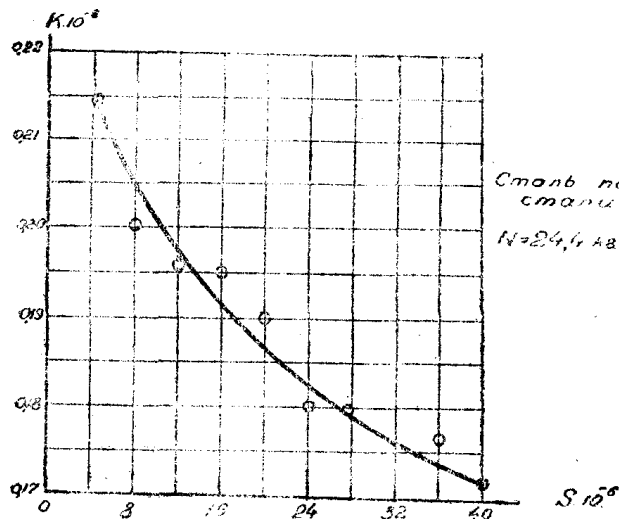
Коэффициент упругости  $K$  определяет отношение упруго сдвигающей силы по прямой  $A_1A$  к величине упругого смещения. Таким образом получим:

$$K_1 = \frac{P_{y1}}{S_{y1}}; K_2 = \frac{P_{y2}}{S_{y2}}$$

Можно так получить целый ряд значений коэффициента упругости для данного контакта.

Нами было произведено много опытов по определению коэффициентов упругости с различными контактами при различных шероховатостях и во всех случаях наблюдается небольшое уменьшение коэффициента упругости по мере продвижения вперед, то есть  $K_1 > K_2 > K_3$  и т. д.

На фиг. 7 показан график изменения коэффициента упругости в зависимости от величины смещения.



Фиг. 7

### Упругая зона смещения

На прилагаемом графике фиг. 8 показано смещение образца по кривой  $OA$  и затем спуск по прямой  $AA_1$ , образец возвращается обратно неполностью, так как смещение было не только упругое, но и пластическое в одно и то же время.

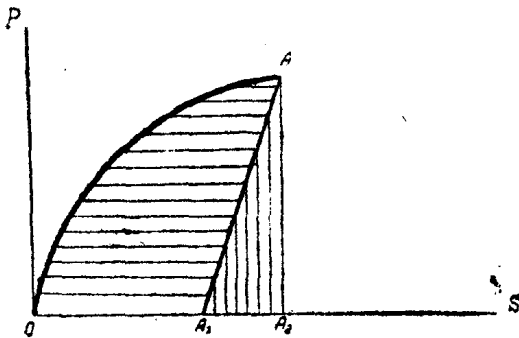
Площадь графика представляет из себя работу, поглощенную контактом, при этом площадь  $OAA_1$  — это работа пластической деформации и  $A_1A_1A_2$  — упругой, так что смещение состоит из двух зон: упругой  $A_1A_2$  и пластической  $OAA_1$ . По мере продвижения образца вперед упругая зона возрастает до определенной величины. За точкой  $A$  кривая превращается

почти в горизонтальную прямую, поэтому треугольник  $A_1 A_2 A$  больше не увеличивается по высоте, то же самое происходит с основанием треугольника  $A_1 A_2$ . На фиг. 9 показана зависимость величины упругой зоны  $S$  от величины общего смещения.

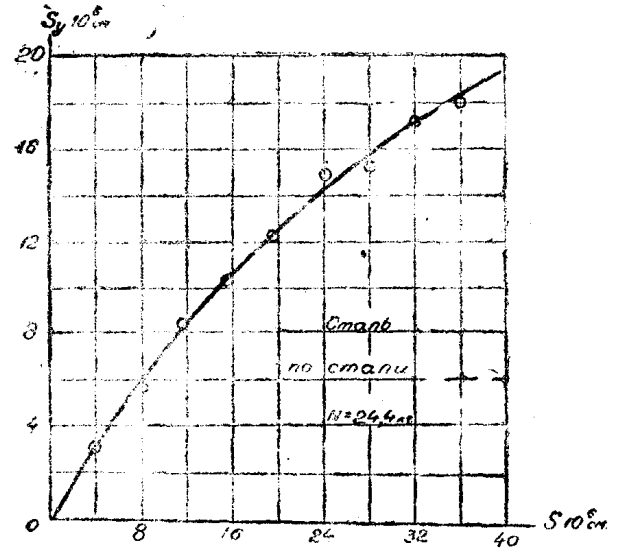
Величина коэффициента трения покоя всецело зависит от величины упругой зоны смещения

$$\mu = \frac{P_y}{N},$$

т. е.  $\mu$  зависит от  $P_y$ , в свою очередь величина  $P_y$  связана с  $S_y$  коэффициентом упругости.



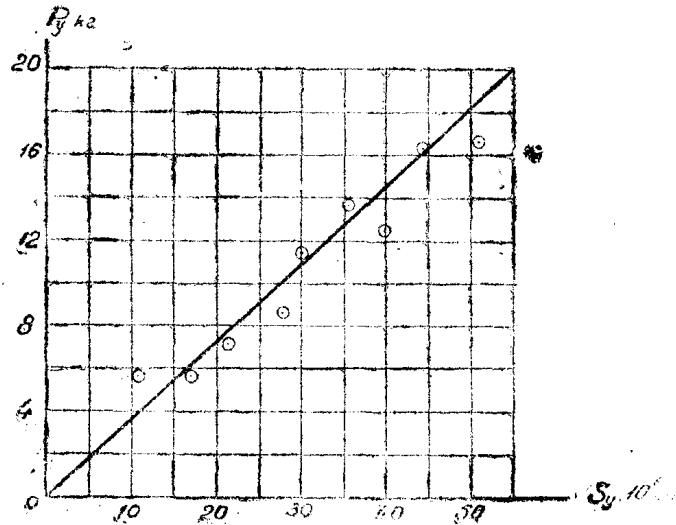
Фиг. 8



Фиг. 9

Можно считать, что  $P_y = K S_y$ , следовательно,  $\mu = \frac{K S_y}{N}$ .

Нами был произведен опыт с увеличением коэффициента трения. Во время увеличения его неизменно увеличивалась и упругая зона. Увели-



Фиг. 10

чение сделано путем притирания. Результаты этого опыта показаны на фиг. 10.

Если не принимать во внимание незначительного изменения коэффициента упругости, то можно считать, что  $P_y$ , а вместе с тем и  $\mu$  прямо пропорциональны величине упругой зоны:  $\mu = \frac{K S_y}{N}$ , где  $K S_y = P_y$ .

## Пластические свойства контакта

### Текучность

Выше было показано, что смещение контактных поверхностей не совсем упруго, вместе с упругими свойствами проявляются также и свойства пластические. Текучность, правда незначительная, имеет место на свежем контакте при силе любой величины. Движение образца мы можем рассматривать как бы состоящим из двух движений: упругого и пластического.

В начале смещения превалирует упругое смещение, а пластическая же часть смещения мала. Чем дальше идет продвижение образца, тем больше возрастает пластическая часть. Наконец, при достижении сдвигающей силой максимального значения происходит плавное, почти равномерное движение.

Смещение образца также можно производить порциями. Приложенная сила  $P$  вызовет упругое смещение вперед, затем будет происходить пластическое движение с убывающей скоростью до полной остановки. Увеличение сдвигающей силы снова дает упругое смещение, после которого образец опять движется пластически с убывающей скоростью, но путь проходит уже больший, чем в предыдущем движении. И чем дальше идет смещение, тем больше пластический ход от одного и того же приращения силы. При этом величина замедления делается все меньше, — скорость приближается к постоянной величине и, когда эта величина достигнута, движение совершается с постоянной скоростью при постоянной силе.

### Релаксация

При определенном значении движущей силы, как мы видели, начинается чисто пластическое движение, при этом упругая зона больше не растет и вся работа затрачивается на пластическое сопротивление. В этом случае быстрое уменьшение движущей силы вызовет, как мы знаем, упругое движение назад. Если же силу уменьшать по определенному закону, то можно достичь того, что движение вперед прекратится, в то же время не будет движения и назад, то есть поверхности контакта будут относительно друг друга находиться в покое. Но для этого сила  $P$  не должна оставаться постоянной, иначе движение будет совершаться вперед; не должна она также убывать очень быстро. Силу  $P$  нужно уменьшить по некоторому закону  $P=f(t)$ . Таким образом, если стремиться удержать образец на месте, убавляя постепенно силу  $P$ , то мы и получим явление релаксации контакта.

В наших опытах зависимость падения движущей силы во времени являлась таким образом. Во время опыта мы следили за тем, чтобы смещения не было, чтобы образец оставался на одном месте. При этом, конечно, силу уменьшали и по секундомеру следили за ее уменьшением. Наконец, при уменьшении силы  $P$  до значения  $P_y$  образец останавливался. Падение силы за время релаксации будет  $P - P_y = q$ .

Опыт проделан с контактами: сталь по стали, медь по свинцу и медь по свинцу с насыщенным коэффициентом трения.

Нормальное давление  $N=24,4$  кг, увеличение 143000 раз. Результаты показаны на графике фиг. 11, где нанесены три кривых 1, 2 и 3.

1 — сталь по стали — свежий контакт,

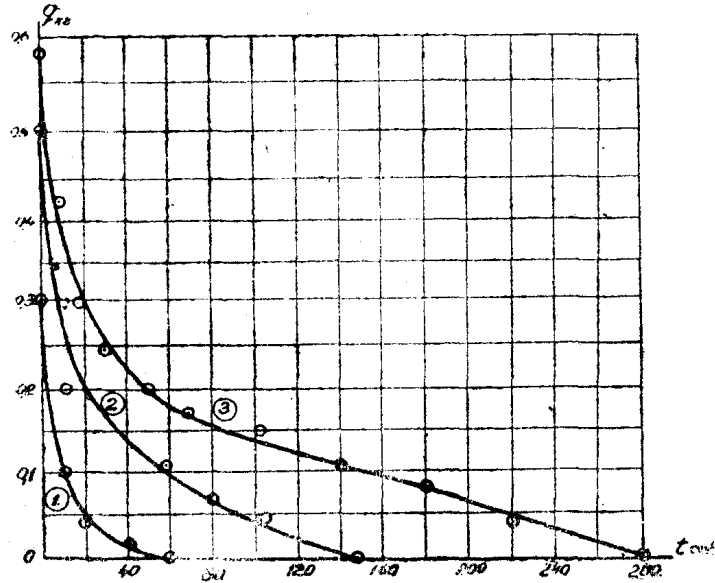
2 — медь по свинцу — свежий контакт и

3 — медь по свинцу — контакт с насыщенным коэффициентом трения.



Из графика видно, что релаксация контакта сталь по стали идет быстрее, чем у контакта медь по меди. Насыщение контакта приводит к тому, что релаксация идет более медленно.

Вся эта разница, возможно, объясняется тем, что у контакта медь—свинец действительная площадь соприкосновения благодаря большей пластичности оказывается значительно больше, чем у контакта сталь по стали.



Фиг. 11

У насыщенного контакта, конечно, площадь соприкосновения еще больше, а раз это так, то, следовательно, и количество неровностей, участвующих в релаксации, больше. Здесь ясно только то, что время релаксации зависит от действительной площади соприкосновения или во всяком случае как-то связано с ней.

### Движущий фактор

Смещение контактных поверхностей вызывается движущей силой  $P$ . Если обратным снятием силы  $P$  создать упругую зону, то по этой зоне пластического движения нет до тех пор, пока сила  $P$  не превзойдет значения упругой силы  $P_y$ . Для пластического движения необходима добавочная сила  $q$

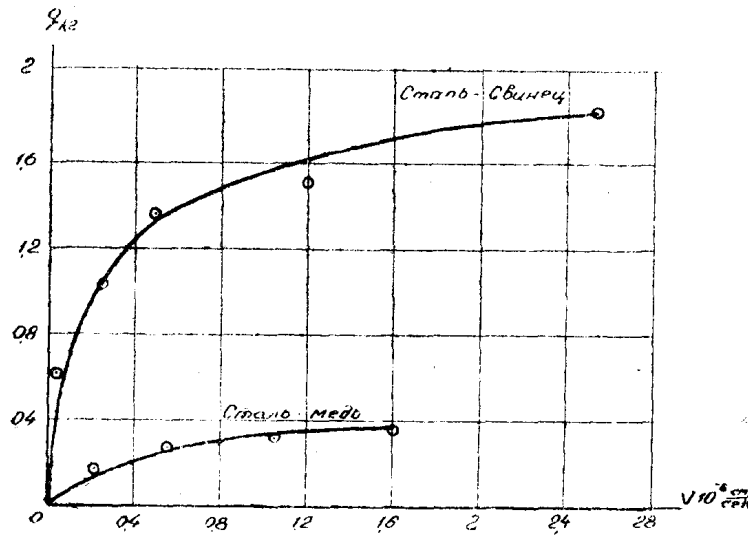
$$P = P_y + q.$$

Если сила  $q = 0$ , то движения нет. Следовательно, при движении работу совершает сила  $P$ , но благодаря наличию  $q$  сила  $q$  как бы разрешает силе  $P$  совершать работу. Назовем добавочную разрешающую силу  $q$  движущим фактором, ибо хотя эта сила неспособна сама совершить движения, но она создает условие возможности движения посредством силы  $P$ .

Движущий фактор  $q$  влияет на пластическое движение таким образом: чем больше  $q$ , тем больше скорость пластического движения.

На графике (фиг. 12) показана зависимость движущего фактора от скорости движения. Движущий фактор определялся путем релаксирования, которое мы начинали при различных скоростях пластического движения.

Движущая сила  $P$  уменьшалась до тех пор, пока не наступал покой контакта при постоянной, неубывающей силе, то есть для создания покоя



Фиг. 12

уже не требовалось производить релаксирования—релаксация заканчивалась.

### Временная упругость

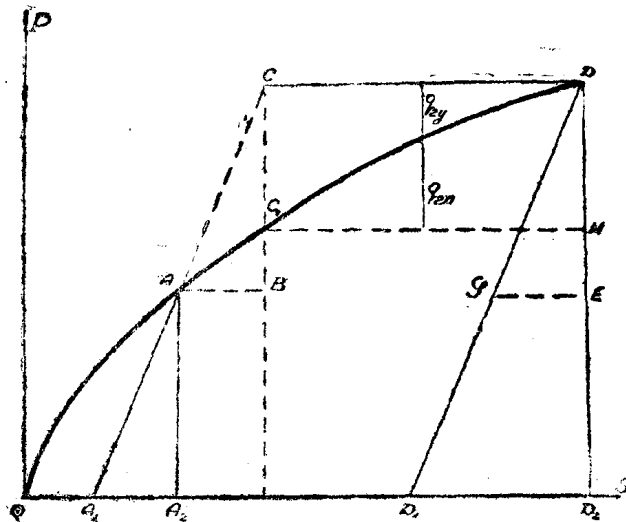
На фиг. 13 показана кривая смещения  $OAD$ . Допустим, что медленным приращением силы  $P$  мы произвели смещение до точки  $A$ . Чтобы вызвать дальнейшее смещение, нужно приложить добавочную силу.

При медленном росте фактора  $q$  движение пойдет по кривой дальше по участку  $AD$ , но если фактор  $q$  увеличить очень быстро, то произойдет упругое смещение по прямой  $AC$ , которая является продолжением прямой  $A_1A$ . Произведя такое смещение, мы сразу же можем снять обратно движущий фактор  $q$  и получим обратное упругое движение по  $CA$  в точку  $A$ .

Если же спуска по  $CA$  не произвести, то есть оставить движущий фактор  $q$ , не снимая его, то движение пойдет по прямой  $CD$  и закончится на кривой в точке  $D$ .

После этого спуск можно произвести только по прямой  $DD_1$ , в этом случае получится остаточный путь  $OD_1$ .

Упругая энергия движущего фактора, выраженная треугольником  $ABC$ , имеет временный характер. Правда, эта энергия попрежнему останется упругой (треугольник  $GED$ ), но эта упругая энергия уже не будет



Фиг. 13

представлять энергии движущего фактора, ибо теперь уже она не способна к разрешению дальнейшего смещения, разрешающая способность ее стала равной нулю, движущий фактор  $q = CB$  превратился в приращение упругой силы  $P = DE$ . До пластического движения по прямой  $CD$  фактор  $q = CB$  был временным, стало быть, и упругость, выраженная треугольником  $ACB$ , была временной. Итак, временная упругость  $ACB$  превратилась в постоянную  $DGE$ . Произошло качественное изменение упругой энергии, упругий фактор  $q$  исчез.

Можно не допустить движения по  $CD$ , сняв путем релаксации движущий фактор по прямой  $CC_1$ , и прийти на эту же кривую в точку  $C$ , тогда пластического движения не будет. При этом упругая сила  $P_y$  получит приращение  $q_1 = CB$ . Значит, на пластическое движение израсходована была сила  $q_2 = CC_1$ . В конце пластического движения мы имели приращение, равное  $q = FE$ , следовательно, во время пластического движения происходило перераспределение упругого фактора  $q$ .

В любой точке пластического движения

$$q_2 = q_{2y} + q_{2n}.$$

В начале пластического движения  $q_{2y} = 0$ ,  $q_{2n} = q_{2n \max}$ .

В конце его  $q_{2y} = \max$ ,  $q_{2n} = 0$ ,

то есть во время этого движения происходил переход  $q_{2n}$  в  $q_{2y}$ .

Если принять участок кривой  $C_1D$  за прямую, тогда можно считать, что отношение  $\varepsilon = \frac{q_{2n}}{q_{2y}}$  меняется по закону гиперболы; так как в данном случае участок кривой  $C_1H$  принят за прямую, следовательно, он является диагональю прямоугольника с  $DC_1H$ .

Отношение  $\varepsilon = \frac{q_{2n}}{q_{2y}}$  можно выразить через длину пластического хода

$$S_n \frac{q_{2y}}{S_n - x} = \frac{q_2}{S_n}, \text{ следовательно, } \frac{q_{2n}}{x} = \frac{q_{2y}}{S_n - x}; \quad \frac{q_{2y}}{q_{2n}} = \frac{S_n - x}{x}$$

или  $\varepsilon = \frac{S_n}{x} - 1$ , то есть изменение соотношения движущих факторов происходит по закону гиперболы. Очевидно, и скорость пластического движения изменяется по этому же закону, так как график скорости похож именно на гиперболу, поэтому можно сделать заключение, что основным фактором в пластическом движении является фактор  $q_2$ . Скорость движения пропорциональна активному остатку движущего фактора  $q_{2y}$ .

После того, как произойдет полное, качественное изменение движущего фактора в пассивный фактор  $P$ , движение будет прекращено; чтобы вызвать дальнейшее движение, нужно снова создать активный движущий фактор  $q_{2y}$ .

### Энергия контакта при смещении

Как видно из графика фиг. 13, в самом начале смещения уже нет чисто упругого или чисто пластического движения. Чисто упругое смещение наблюдается только при смещении назад, а также при повторном смещении вперед. Свеже поставленный контакт первое смещение дает смешанным образом, при этом упругая часть смещения обратима, то есть на какую величину смещается образец вперед, на такую же величину продвигается назад после удаления смещающей силы. У свеже поставленного контакта нет такой полной обратимости, потому что сразу же, в начале

смещения вступает в действие пластичность, так что в дальнейшем движении подведенная энергия распределяется на две неравные части: упругую и пластическую.

По мере смещения соотношение количества упругой и пластической энергий изменяется. Доля упругой энергии уменьшается, пластическая же часть растет, но сумма их равна общей поглощенной работе

$$W_{об} = W_{упр} + W_{пл}$$

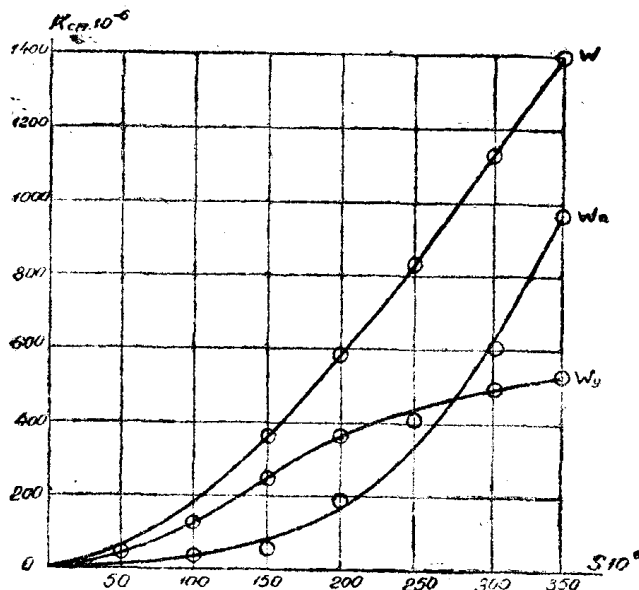
Опыт со смещением образцов дает возможность отделить одну энергию от другой. Для выявления соотношения этих энергий было сделано много опытов. На фиг. 14 показано смещение стали по целлюлозе при нормальном давлении  $N = 17,6$  кг.

В различных точках кривой производились упругие спуски. Так что по ходу опыта мы имели возможность получить несколько треугольников таких, какие показаны на фиг. 13, это треугольники  $AA_1A_2$  и  $DD_1D_2$ .

Общая работа представлена площадью  $OADD_2$ , упругая энергия — треугольником. Вычитая из общей площади площадь треугольника, получим величину пластической энергии.

На фиг. 14 изображены кривые изменения энергии в зависимости от смещения одной контактной поверхности относительно другой.

Так как упругая сила стремится к пределу, то и работа стремится к некоторому пределу. На графике фиг. 14 кривая  $W_y$  стремится в данном случае к величине  $W_y = 500 \cdot 10^{-6}$  кг. см — это предельное упругое насыщение. Кривая пластической энергии переходит в наклонную прямую. Это значит, что дальнейшее движение должно пойти при постоянной силе, и тогда  $W = PS$ , что и выражается прямой. По той же причине и общая энергия далее в чисто пластическом движении представляется прямой, параллельной графику  $W_{пл}$ .



Фиг. 14

