

МИКРОТРЕНИЕ

И. Р. КОНЯХИН

Причины трения

Трение всегда сопровождается превращением механической энергии в другие ее виды, главным образом, в теплоту, что и воспринимается нами как сопротивление движению. Всего имеется четыре фактора, обуславливающие трение: молекулярное сцепление трущихся поверхностей, упругие деформации неровностей, пластические их деформации и, наконец, разрушение крайнего слоя поверхности диспергированием, то есть истиранием, превращением материала, участвующего в трении, в пыль. Эти факторы являются как бы отдельными преобразователями механической энергии в тепловую и другие ее формы.

Молекулярное сцепление проявляется в более сильной степени, если соприкасающиеся поверхности отполированы, и чем лучше полировка, тем сильнее и молекулярное сцепление. По Ребиндеру существует три рода полировки¹⁾.

1. Предел шлифования, как например, в плитках Иогансона, когда царапины еще остаются.

2. Снятие адсорбированного слоя стеариновой кислотой, растворенной в керосине.

3. Пластическое течение материала на полируемой поверхности. В последнем случае отполированные поверхности могут свариваться, при этом разнородные металлы в месте сварки дают сплав.

Гладкость поверхности асимптотически приближается к определенной величине и коэффициент трения стремится к своему конечному значению. При увеличении гладкости молекулярное сцепление возрастает, поэтому может произойти увеличение трения.

Упругая деформация неровностей, очевидно, не может поглощать энергию при трении в значительных количествах, так как энергия деформированного тела почти полностью отдается обратно. Если одна неровность упруго деформирует другую, то последняя накапливает энергию и затем возвращает ее, подталкивая вперед ранее деформировавшую ее неровность. Во время пластической деформации неровностей трущихся поверхностей механическая энергия движения превращается в теплоту.

И последний фактор трения—это износ поверхности вследствие отрыва частиц от трущихся поверхностей. На этот отрыв, конечно, затрачивается энергия движения и тем больше, чем меньше скорость трения, так как при меньших скоростях материал пластичнее.

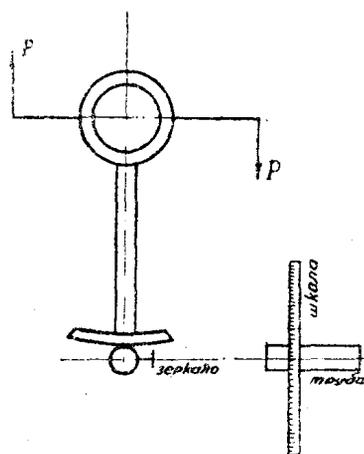
В настоящей работе мы поставили своей целью хотя бы до некоторой степени осветить вопрос о трении при микроскопически малых скоростях движения. Такое трение существенным образом отличается от трения с обычными скоростями.

¹⁾ Кузнецов В. Д. Физика твердого тела, том IV. Томск, 1947 г.

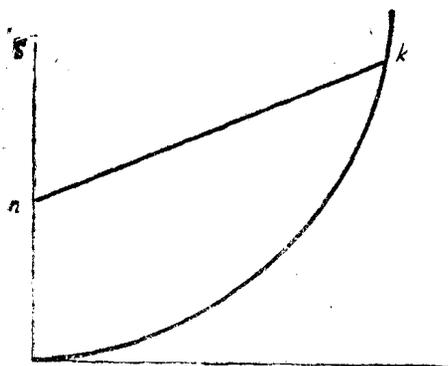
Некоторые явления этого трения изучались А. В. Верховским на специально сконструированном приборе. В приборе Верховского (фиг. 1) образец имеет нижнюю кольцевую поверхность с диаметрами $D = 24$ мм и $d = 20$ мм. Результаты опытов получались различными в зависимости от того, ставился ли образец спокойно сверху или же он поворачивался в ту или другую сторону. Если образец предварительно поворачивался в сторону действия пары сил PP , то смещения росли по закону прямой, если же в обратную сторону, то получались кривые.

Если постепенным увеличением пары сил довести смещение до точки K , а затем уменьшать пару до нуля, то оказывается, что смещение изменяется по прямой $нк$. При повторении увеличения движущей пары смещение проходит по прямой $нк$, а затем происходит продолжение кривой. При испытании различных материалов смещения получались разными. Зависимость этих смещений от величины движущей пары показана на графике (фиг. 3). Легче всего смещается латунь и труднее—сталь.

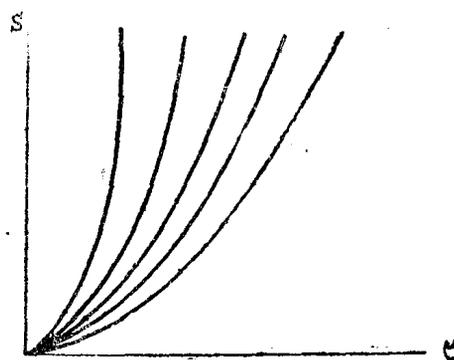
Таким образом, по опытам А. В. Верховского, видимое движение при сухом трении возникает не сразу после приложения движущей силы, тело сначала несколько подается вперед, до тех пор, пока сила эта не достигает определенной величины. Тогда происходит сильный скачок скорости и начинается обычное, видимое простым глазом движение. Во время предварительного смещения коэффициент трения возрастает от нуля до коэффициента трения покоя и затем скачком падает до коэффициента трения движения. Величина всего предварительного смещения достигает порядка $S = 2, 2,5 \mu$ и далее происходит срыв смещения, т. е. начинается обычное движение.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

Автор настоящей статьи поставил себе целью расширить изучение явления трогания с места при сухом трении. Для этой цели был заново сконструирован и построен прибор, схема которого приведена на фиг. 1.

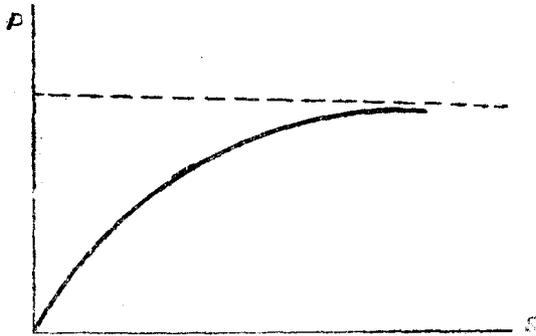
Произведя большое количество опытов, мы пришли к заключению, что опытами Верховского было сделано только начало изучения данного вопроса, что некоторые явления при трогании с места им не были изучены.

Автор, конечно, не считает, что он изучил все явления в достаточной степени—предстоит еще дальнейшая работа в этом направлении, а все, что получено им до сих пор, описано ниже.

Микросмещение

Если во время предварительного смещения выдерживать скорость постоянной, то срыва не произойдет, и движение тогда может совершаться как угодно долго. Опыт на приборе показал, что при скорости, равной 6 м в секунду, происходило смещение на величину равную 60 м , что в 24 раза больше, чем в опытах А. В. Верховского. Опыт длился более 4 часов, и срыва, то-есть скачкообразного перехода в видимое движение, не было.

Если от начала смещения увеличивать движущую силу, при этом приращение ее взять асимптотически убывающим до нуля, то получается непрерывное движение с постоянной скоростью. Такое движение, совершающееся с микроскопическими скоростями, существенно отличается от быстрого движения тем, что оно



Фиг. 4

происходит только под действием возрастающей силы. Таким образом, исходя из вышеизложенного, трение следует разделить на 4 вида:

- 1) трение покоя,
- 2) упругое смещение,
- 3) пластическое трение,
- 4) трение скольжения.

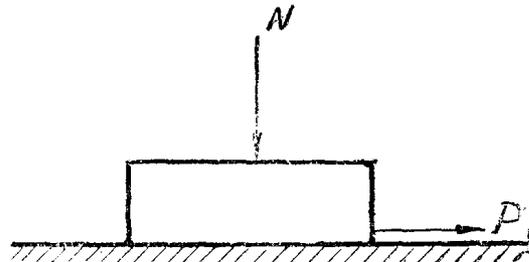
Упругое смещение характеризуется тем, что если движущая сила не превосходит определенного предела, то пластического трения нет, и после удаления этой силы образец возвращается на

прежнее место, при этом наблюдается упругое последствие в течение 2—3 минут.

Трение покоя

Движущая сила, приложенная к телу, находящемуся на некоторой поверхности, вызывает между поверхностями соприкосновения силу трения. Сначала начинается упругое, затем пластическое смещение. Силой трения покоя обычно называют то сопротивление движению, при котором происходит переход к скольжению.

На трение покоя существенное влияние имеет продолжительность неподвижного контакта. Были проведены опыты с продолжительностью неподвижного контакта $t = 4 \text{ мин}$; $t = 10 \text{ мин}$ и $t = 25 \text{ мин}$. Смещение образца производилось непрерывно возрастающей силой, созданной при помощи водяной струи мощностью в 110 г/мин , что на нашем приборе соответствует приращению силы, приложенной к образцу $\frac{\Delta P}{\Delta t} = 1650 \text{ г/мин}$.



Фиг. 5

Результаты опытов приведены в табл. 1. Время дано в минутах, смещение S —в микронах.

Таблица 1

| t | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|
| S_4 | 0,111 | 0,290 | 0,579 | 1,38 | 4,00 | 7,60 | 11,2 | | | | | | | |
| S_{10} | 0,083 | 0,138 | 0,224 | 0,304 | 0,415 | 0,525 | 0,690 | 0,940 | 1,32 | 1,93 | 3,04 | | | |
| S_{25} | 0,028 | 0,083 | 0,165 | 0,248 | 0,331 | 0,427 | 0,552 | 0,704 | 0,910 | 1,21 | 1,63 | 2,21 | 3,02 | 4,42 |

Если величину смещения во всех случаях взять равной 4 μ , то величина силы P выразится табл. 2.

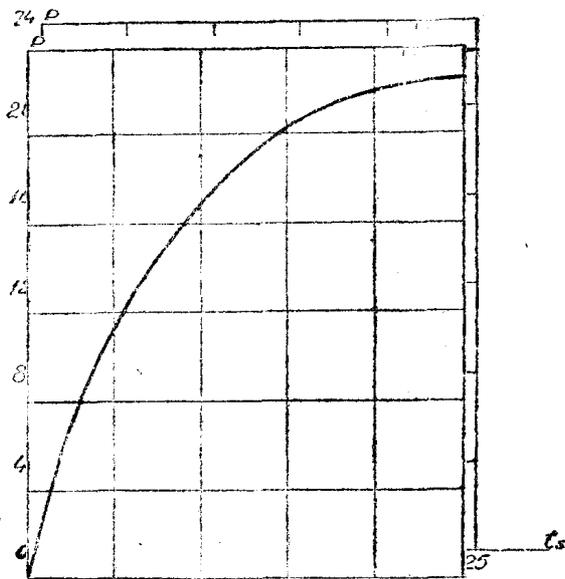
Таблица 2

| t_s | 4 мин | 10 мин | 25 мин |
|-------|--------|---------|---------|
| P | 9900 г | 16500 г | 22800 г |

Продолжительность неподвижного контакта t_s , сопротивление смещению P .

Продолжительность неподвижного контакта имеет более существенное значение в первые минуты. В нашем опыте наименьшей продолжительностью стояния было время в 4 мин. Было бы интересно взять это время возможно меньше, но, к сожалению, это осуществить трудно из-за того, что прибор для настройки его на опыт требует некоторого времени, в течение которого образец находится под действием вертикальной нагрузки. Во время продолжительного стояния образец под действием вертикальной нагрузки опускается вниз замедленным движением¹⁾ вероятно по тому же закону, по которому растет смещающая сила в зависимости от продолжительности стояния.

При опускании образца происходит пластическая деформация неровностей в вертикальном направлении. Вследствие этого возрастает истинная площадь контакта, а вместе с тем и молекулярное сцепление. По мере опускания образца скорость его движения вниз уменьшается. Неровности при этом, уменьшаясь по высоте, увеличиваются в толщине. Кроме того, пластически деформированный материал становится все жестче, и поэтому для срезания и деформации неровностей в горизонтальном направлении требуется больше работы. Также



Фиг. 6

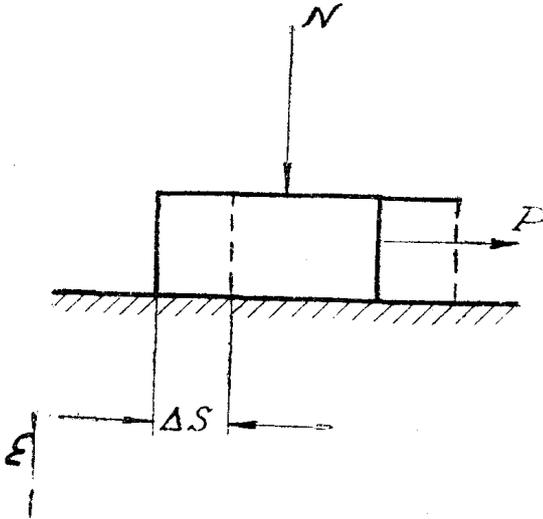
¹⁾ Кузнецов В. Д. Физика твердого тела, том IV. Томск, 1947 г.

больше требуется работы на преодоление молекулярного сцепления, так как количество сближенных молекул возрастает с временем неподвижного контакта.

Во время горизонтального смещения образца неровности его, находящиеся во впадинах, должны совершить подъем из впадин и взойти на выступы, которые должны упруго и пластически осаживаться, что также требует расхода работы.

Упругое смещение

Упругое смещение характеризуется тем, что образец под действием горизонтальной силы P несколько смещается вперед; после же удаления этой силы возвращается на старое место. Опыт производился путем приложения и удаления движущей силы P , равной 15 кг при вертикальном давлении на образец $N=70$ кг. Упругое смещение происходило на величину $S=0,36$ м. При удалении силы P образец возвращался обратно. Полное упругое смещение получалось таким образом: весь путь $S=0,36$ м образец проходил как бы в два приема, 0,27 м он проходил сразу, а остальные 0,09 м — в течение 3 мин. В такой же последовательности он возвращался обратно, то есть три четверти пути проходил вместе с удалением силы P , а остальную четверть двигался медленно. Здесь,



Фиг. 7

очевидно, сказывалось упругое последствие трущихся поверхностей.

Пластическое трение

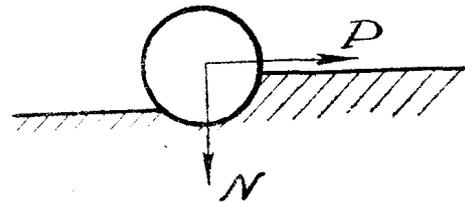
Пластические деформации неровностей трущихся поверхностей поглощают львиную долю всей механической энергии движения, превращая ее в теплоту.

При качении катка по твердой поверхности происходит непрерывное смятие последней, так что в результате остается след или при качении колеса остается колей. На образование этой колеи или следа и затрачивается механическая работа.

Каток все время приходится втаскивать на выступ, который в свою очередь осаживается вниз вследствие пластической деформации.

То же самое происходит и во время скольжения одного тела по другому: неровности одного тела втаскиваются на неровности другого, происходит их осаживание, следовательно, производится работа.

В микротрении не происходит истирания трущихся поверхностей вследствие отрыва или среза неровностей. Пластические деформации здесь происходят полностью, то есть, иначе говоря, получается чистое пластическое трение.



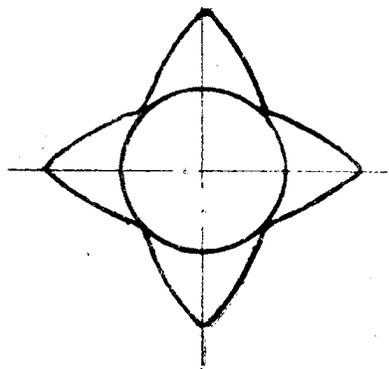
Фиг. 8

В нашем опыте движение было со скоростью 5 *тп*/сек, при такой скорости нельзя говорить о какой-либо хрупкости материала, поэтому можно сказать, что диспергирования не было.

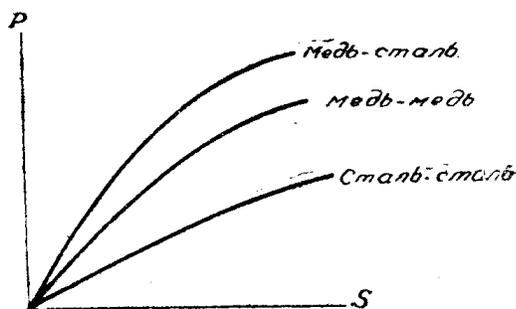
Влияние различных факторов на микротрение

Материал трущихся поверхностей

Для опытов были взяты следующие контакты: медь по меди, сталь по стали и медь по стали. Шероховатость поверхностей во всех этих случаях была одинаковой.



Фиг. 9



Фиг. 10

Труднее всего смещается медь по стали и легче—сталь по стали. Срыв движения у разнородных материалов наступает быстрее.

Шероховатость трущихся поверхностей

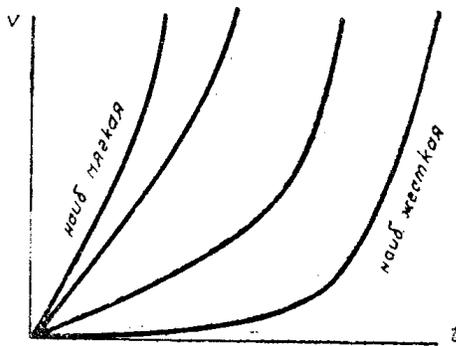
Были проведены для сравнения два рода опытов с одним и тем же образцом, при этом в одних случаях поверхности обрабатывались шкуркой, в других, обрабатывались более мелкой шкуркой, затем шлифовались мелом до блеска. Шлифованный образец смещается труднее, а срыв движения происходит раньше.

Жесткость трения

Жесткостью поверхности при трении мы называем способность ее сопротивляться смещению. При жестких поверхностях срыв микротрения наступает быстрее. Молекулярное сцепление сильно. Жесткость трения зависит от твердости материалов, величины неровностей и присутствия посторонних твердых веществ. При этом величина неровностей влияет на жесткость обратным образом: больше неровности—меньше жесткость.

В начале смещения поверхность более жесткая, чем впоследствии, то есть от приращения силы ΔP поверхности смещаются на меньшую величину. В дальнейшем движение становится плавнее.

На графике показано изменение скорости движения со временем, при различных жесткостях (фиг. 11). Изменение скорости происходило под действием непрерывно возрастающей силы. Наиболее жесткими являются поверхности шлифованные, загрязненные посторонними веществами.



Фиг. 11

Давление между трущимися поверхностями

Для определения действия давления на величину смещения была взята движущая сила $P = 7500$ г, давление же изменялось.

С возрастанием давления смещение под действием одной и той же силы уменьшается, видимо, по закону показательной функции, то есть в конце концов приращение давления уже перестает оказывать влияние на величину смещения образца.

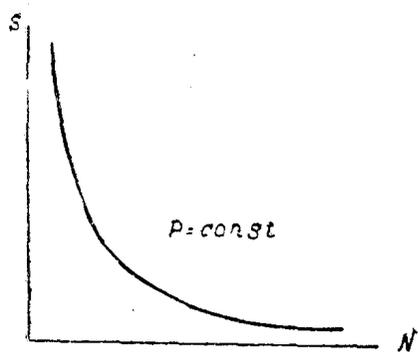
Результаты опытов приведены в табл. 3.

Таблица 3

| N кг | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|
| S ¹⁾ | 7,45 | 1,27 | 0,25 | 0,19 | 0,17 | 0,14 |

Площадь трущейся кольцевой поверхности образца была $F = 1,4$ см².

Когда происходит движение образца, то продолжительность неподвижного контакта равна нулю. Движение может совершаться с различными



скоростями, поэтому и углубление движущегося тела будет происходить на разную величину, оно будет меньше при большей скорости. При очень быстром скольжении можно считать, что углубления не происходит и сцепление остается постоянным, притом незначительным по величине. В начале движения образец поднимается по неровностям, и молекулярное сцепление падает — движение получается ускоренным. При уменьшении скорости происходит приятие неровностей, образец опускается, сцепление возрастает и скорость еще больше уменьшается.

Влияние присутствия посторонних веществ

Между трущимися поверхностями всегда могут находиться посторонние вещества в виде загрязнений или же остатков, получающихся в результате шлифования или просто истирания от трения. Присутствие таких веществ между плоскостями трения сильно повышает сопротивление движению.

Нами был проделан опыт с одним и тем же образцом. Испытываемые поверхности образца сначала шлифовались тонкой шкуркой, потом чистой бумагой до тех пор, пока на ней переставала появляться чернота. Во второй раз поверхности образца были слегка припудрены тонким порошком мела; присутствие мела на глаз не было заметно. Незначительное присутствие мела сильно увеличило сопротивление смещению, при этом сила срыва микродвижения, то есть скачкообразного перехода на обычное движение, была примерно в два раза больше, чем у чистого образца, смещение же до срыва в два раза меньше. Иначе говоря, жесткость трения увеличилась.

¹⁾ S — смещение в микровах.

Движение под действием постоянной силы

Явление смещения образца под действием постоянной силы происходит следующим образом. Движение сначала идет ускоренно, скорость достигает некоторого максимума. После этого начинается замедленное движение и образец останавливается. Чтобы вызвать дальнейшее движение, нужно движущую силу увеличить, тогда описанный процесс повторится. Так можно повторять до тех пор, пока не наступит срыв, то есть микро-движение заменится обычным движением.

Опыт производился на образцах медь по меди матовой шероховатости. Наблюдение сделано в конце смещения, перед срывом, так как в этом случае смещение происходит более мягко и характер движения проявляется нагляднее. Догрузка движущей силы была дана в 1500 г в течение 20 сек или, иначе говоря, приращение силы шло с интенсивностью $\frac{\Delta P}{\Delta t} = 75 \text{ г/сек}$, при этом начальная скорость, при которой началась подгрузка, была $V = 0,03 \text{ м/мин}$.

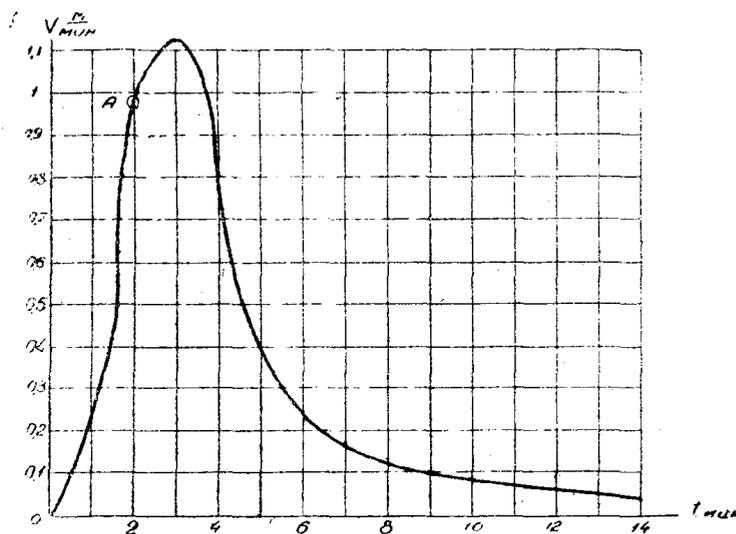
Приложенная ранее сила, при помощи которой образец был приведен близко к срыву, равнялась 31500 г. Таким образом, в данном опыте участвовала постоянная сила $P = 33 \text{ кг}$ при вертикальном давлении на образец $N = 80 \text{ кг}$.

Результаты опыта показаны в табл. 4.

Таблица 4

| $t \text{ мин}$ | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-----------------|---|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $S \mu$ | 0 | 0,248 | 1,24 | 2,34 | 3,09 | 3,48 | 3,73 | 3,89 | 4,03 | 4,11 | 4,19 | 4,26 |

Время дано в минутах, смещение — в микронах.



Фиг. 13

Эти данные представлены в виде графика скорости (фиг. 13). Точка А соответствует концу приращения силы, с этого места и далее движение идет при постоянной силе.

Значение начальной скорости микродвижения

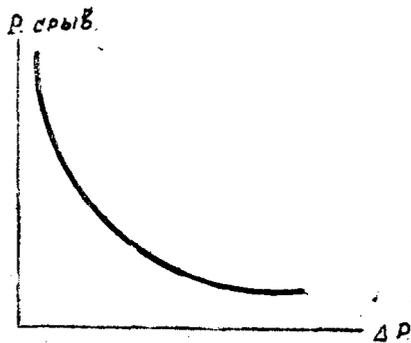
Как мы видели выше (график скорости), микродвижение при действии постоянной силы затухает. Можно новой порцией нагрузки вызвать соответствующее приращение такого смещения, причем это новое смещение начать тогда, когда предыдущее движение начинается при начальной его скорости, равной нулю. Можно новое смещение начать, когда еще предыдущее движение не прекратилось, то есть при некоторой начальной скорости, не равной нулю.

Эта начальная скорость окажет существенное влияние на последующее движение, характер его будет иным, чем при $V_0 = 0$. Величина смещения от действия новой постоянной силы будет больше.

Нужно сказать, что в опытах А. В. Верховского начальная скорость не учитывалась, поэтому и результаты получились другие; медь смещалась легче, чем сталь, в наших же опытах получилось наоборот.

Срыв микродвижения

Сила, при которой происходит срыв микродвижения и, следовательно, переход на видимую скорость, вообще может иметь различную величину в зависимости от того, с какой интенсивностью она возрастала. Чем больше ее приращение, тем меньше срывающая сила. На приведенном графике видно, что она зависит от ΔP по такому же закону, как скорость изменяется под действием постоянной силы. Очевидно, она зависит от скорости.



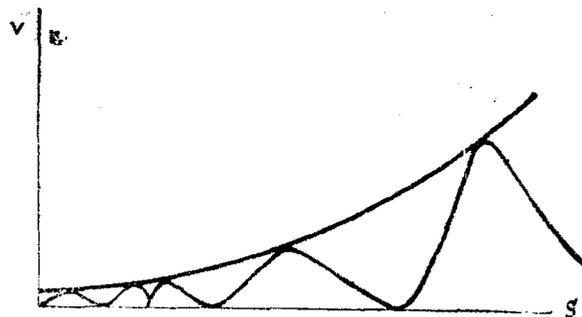
Фиг. 14

Путь, пройденный образцом до срыва, зависит не только от движущей силы, но, следовательно, и от скорости движения, поэтому вести сравнение различных материалов в смысле их смещения, не учитывая скорости, нельзя.

Смещение образца силой, возрастающей отдельными порциями

Как было описано выше, движение под действием постоянной силы постепенно затухает во времени. Чтобы вызвать дальнейшее смещение, нужно увеличить движущую силу, тогда движение повторится.

В наших опытах от каждой последующей порции нагрузки смещение получается все больше и больше. Общее смещение в зависимости от приращения силы показано на графике в виде кривой волнистого характера (фиг. 15).



Фиг. 15

Скорость от последующих нагрузок возрастает и, наконец, наступает быстрый переход микродвижения в обычное в течение 2—3 сек; скорость при этом увеличивается примерно в 30000 раз.

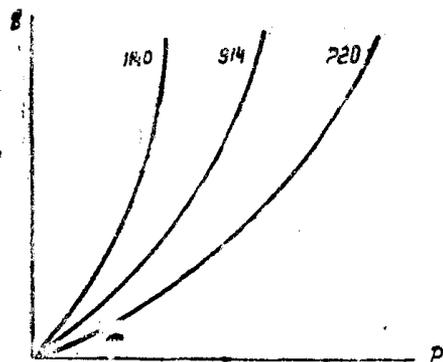
Смещение непрерывно возрастающей силой

В этих опытах непрерывно возрастающая сила создавалась струей воды. В каждом опыте интенсивность струи менялась таким образом:

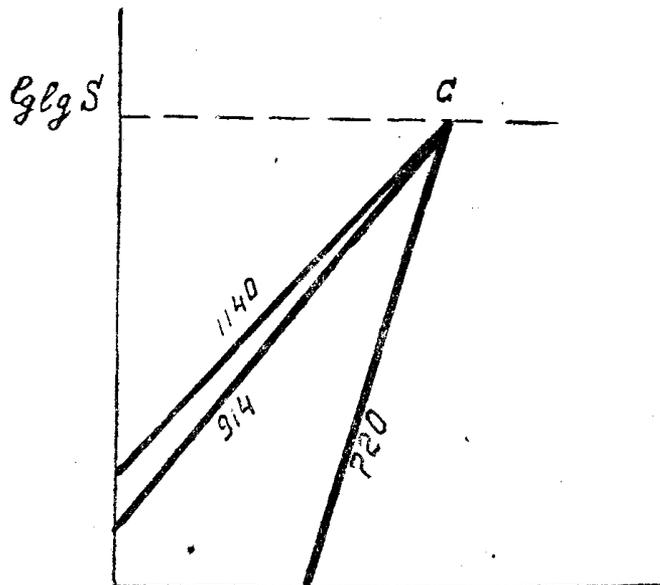
$$\frac{\Delta P}{\Delta t} = 720 \text{ г/мин}; \quad \frac{\Delta P}{\Delta t} = 914 \text{ г/мин} \quad \text{и} \quad \frac{\Delta P}{\Delta t} = 1140 \text{ г/мин.}$$

Зависимость смещения от силы показана в виде кривых, изображенных на графике (фиг. 16). Ясно, чем больше интенсивность струи, тем быстрее движение. В показанных на фиг. 17 координатах эти кривые выпрямляются.

При исследовании полученных прямых замечено следующее соотношение



Фиг. 16



Фиг. 17

между приращениями движущей силы и угловыми коэффициентами

$$\text{прямых} \quad \left(\frac{\Delta P_2}{K_2} \right)^2 = \frac{\Delta P}{K_1} \cdot \frac{\Delta P_3}{K_3}$$

Все три прямые сходятся в одной точке C . Высота положения этой точки должна зависеть только от характера трущихся поверхностей, то есть от материала шероховатости, чистоты. Высота положения точки C должна играть такую же роль, как коэффициент трения в обычном скольжении.