

**СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛА ПОВЕРХНОСТИ  
МИКРОСДВИГУ, ОСТАЮЩЕЕСЯ СТАЦИОНАРНЫМ  
ПРИ ИЗМЕНЕНИИ НОРМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ**

И. Р. КОНЯХИН

(Представлено кафедрой сопротивления материалов)

В статье показано, что в законе трения Амонтона-Кулона  $P = A + \nu_s N$  постоянная величина  $A$  может изменяться от различных причин. На величину  $A$  имеет влияние вещество, находящееся между соприкасающимися поверхностями, а также его микротрение.

Множество проведенных нами опытов с трением покоя всегда подтверждало прямую пропорциональность между силой статического трения и нормальной нагрузкой.

Для примера можно показать один из таких опытов, проведенных на образцах: сталь по стали. Испытуемые образцы, поставленные один на другой, нагружались сверху нормальным давлением определенной величины. После этого делалось смещение верхнего тела по нижнему горизонтальной силой, причем до тех пор, пока не происходил срыв поверхностей, то есть переход на обычное относительное их скольжение. Затем повторялось то же самое, но при некотором другом значении нормальной нагрузки, и так далее несколько раз. По полученным значениям срывающих сил и действующих при этом нормальных нагрузок строился график, показанный на рис. 1.

На графике видна прямая линия, проходящая через начало координат.

Таким образом, получается зависимость

$$P = \nu_s N,$$

где  $\nu_s$  — коэффициент статического трения.

Полученная зависимость выражает собой закон Амонтона-Кулона.

Статический коэффициент трения определяется по наклону прямой графика

$$\nu_s = \frac{P}{N} = 0,62.$$

Как показали опыты, на твердых материалах, например сталь, медь, прямая графика проходит через начало координат, на мягких же, например цинк, прямая графика проходит выше указанной точки.

Прохождение прямой на графике выше начала координат наблюдается, кроме того, и в том случае, если соприкасающиеся поверхности тугоплавких металлов покрыты каким-либо посторонним веществом.

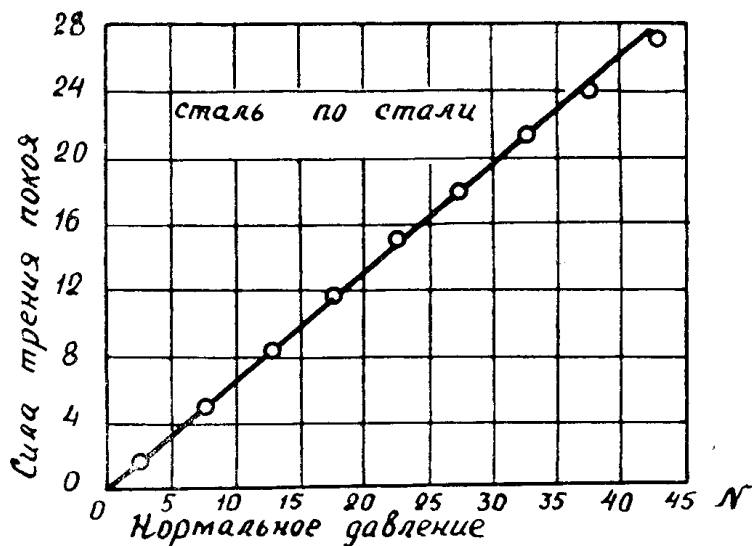


Рис. 1. Зависимость между силой трения покоя и нормальным давлением.

Например, графит, введенный между стальными закаленными поверхностями, способствует тому, что прямая графика проходит выше начала координат, между тем как в отсутствие графита подобного явления с этими поверхностями не наблюдается.

При наличии графита в данном случае уравнение прямой графика получается в виде

$$P = A + \mu N,$$

здесь постоянный член уравнения  $A$  не зависит от величины нормального давления.

Некоторые жидкие смазки, введенные между стальными поверхностями, вызывают появление величины  $A$ , некоторые же другие смазки таким свойством не обладают.

Для подобных испытаний был применен крокус в виде тонкого порошка. Вначале коэффициент трения оказался равным  $\mu_s = 0,1$ , здесь крокус действовал как смазка. После притирания образцов под давлением статический коэффициент трения повышался до  $\mu_s = 0,48$ . Это обстоятельство свидетельствует о том, что крокусная пленка, оставшаяся на поверхностях в виде красноватого налета, значительно уменьшилась по своей толщине и сделалась квазитвердым телом. Кроме того, она способствовала появлению силы  $A$ , которая при чистых поверхностях отсутствовала.

Далее опыты с крокусом проводились таким же образом, как и в предыдущем случае, т. е. сила статического трения определялась путем страгивания верхнего образца с места при действии различных по величине нормальных нагрузок.

Всего было проведено три опыта. Первый из них — сразу после притирания образцов, второй — после двух суток предварительного контакта и третий — сразу после второго. При этом в последнем случае сначала производился предварительный срыв поверхностей под давлением в 45 кг, а затем уже определялась сила трения образцов, нагруженных нормальными силами  $N = 5, 15, 25, 35$  кг.

График, помещенный на рис. 2, показывает результаты всех трех опытов в виде наклонных прямых. Прямая 1 представляет собой зависимость между силой трения и нормальным давлением после притирания образцов друг к другу в присутствии на их поверхности крокусной пленки.

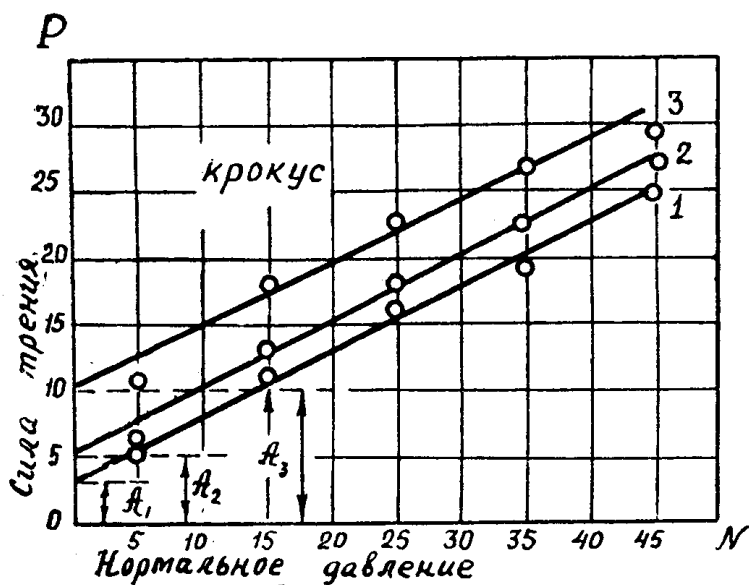


Рис. 2. Изменение величины  $A$  от различных причин: 1 — после притирания, 2 — после двух суток контакта, 3 — после страгивания под давлением в 45 кг.

В этом случае величина  $A_1 = 3$  кг (прямая 1). Линия 2 является графиком трения тех же образцов после 2 суток неподвижного контакта, величина  $A$  повысилась до значения  $A_2 = 5$  кг.

Прямая 3 является графиком трения после предварительного срыва поверхностей при давлении в 45 кг. В последнем опыте значение постоянной силы  $A$  возросло до величины  $A_3 = 10$  кг.

Очевидно, в обоих последних случаях, то есть во время неподвижного контакта и в процессе предварительного срыва поверхностей, происходило уменьшение толщины крокусной пленки, а также ее упрочнение как квазитвердого тела, что и способствовало увеличению постоянной силы  $A$ .

Что касается коэффициента статического трения, определяемого наклоном прямой графика, то он во всех 3 опытах оставался почти неизменным.

В описанных опытах сила трения покоя определялась путем срыва поверхностей, следовательно, находилась наибольшая сила смещения. Однако перед троганием с места тело сначала приобретает микродвижение, которое, ускоряясь, приводит к срыву. Если же к образцу приложить силу тяги такой величины, которая не способна вызвать микродвижения, но при действии ее возможен действительный покой, такая сила окажется по величине меньше, чем сила срыва. Между последней и силой тяги, при которой только что намечается микродвижение, но еще не наступило, имеется различие в их величинах.

Силу при истинном покое обозначим через  $P_s$ , в отличие от силы срыва  $P$ , тогда  $P_s < P$ .

Если провести опыт по определению зависимости между силой истинного покоя  $P_s$  и нормальной нагрузкой, то получается также

линейная зависимость.  $P_s = \mu N$  или же  $P_s = A + \mu N$  в зависимости от условий опыта, так же, как и в предыдущих случаях.

Здесь величина  $\mu$ , являющаяся коэффициентом смещения, меньше, чем величина коэффициента трения  $\mu_s$ , определяемого срывами поверхностей

$$\mu < \mu_s.$$

Если при силе тяги  $P_s$ , не способной еще вызвать микродвижение, уменьшить нормальную нагрузку, то образец начинает двигаться вперед с микроскопически малой скоростью, которую можно наблюдать на нашем приборе, дающем увеличение видимости смещения в 250 000 раз, то есть можно заметить перемещение порядка 0,005 микрона.

Однако после уменьшения нормальной силы можно соответствующим образом уменьшить также и величину тянущей силы настолько, чтобы образец остался на месте. В случае же уменьшения силы тяги на слишком большую величину, не соответствующую нормальной нагрузке, образец сместится назад, т. е. в сторону, противоположную направлению сдвига при силе тяги большей, чем  $P_s$ .

Следовательно, можно уменьшать одновременно и нормальное давление и силу тяги таким образом, что образец будет оставаться на месте, не смещаясь ни вперед, ни назад. В этом случае отношение силы тяги к нормальной нагрузке остается неизменным.

Покажем один из таких опытов, проведенных на материалах: закаленная сталь по закаленной стали. При действии нормальной нагрузки  $N_c = 45 \text{ кг}$  было сделано смещение силой  $P_s = 25,5 \text{ кг}$ . Затем обе силы, как нормальная, так и касательная, уменьшались одновременно таким образом, чтобы образец не смещался ни вперед, ни назад. График этого опыта показан на рис. 3, где видна прямая линия с наклоном к оси абсцисс, равным коэффициенту смещения  $\mu = 0,60$ .

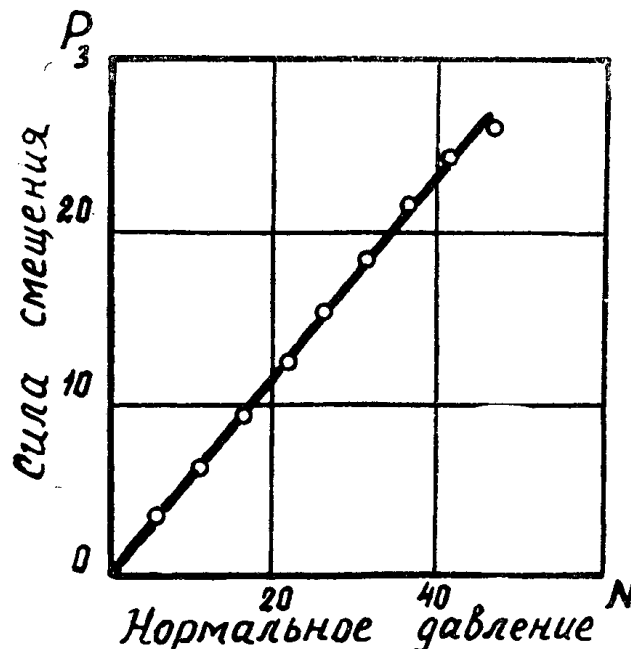


Рис. 3. Одновременное снижение сил тяги и нормального давления при неподвижном образце.

Способность к смещению от уменьшения нормальной нагрузки образцы проявляют не только при силе тяги, равной  $P_s$ , то есть близкой к силе срыва, но также и при любом ее меньшем значении. В этом слу-

чае образец, конечно, не стремится к срыву, но перемещается вперед на некоторую величину, пропорциональную уменьшению давления. Снижение же тянущей силы при постоянном давлении всегда приводит к упругому возврату, то есть движению верхнего образца по нижнему в сторону, противоположную направлению смещений силой тяги.

Ввиду всего сказанного одновременное снижение силы тяги и нормальной нагрузки возможно производить после смещения силой тяги любой величины.

Подобный опыт был проведен на образцах: закаленная сталь по закаленной стали при силах смещения 23 кг, 17 кг, 10 кг и 7 кг. Сила  $P_c = 23$  кг была близка к силе срыва, а остальные значительно меньше ее.

Графики опыта приведены на рис. 4, где показаны все четыре прямые. Первая из них соответствует силе смещения  $P_s = 23$  кг, вторая — силе  $P_c = 17$  кг, третья — силе тяги при смещении  $P_c = 10$  кг и четвертая получена силой тяги  $P_c = 7$  кг. Силы 17, 10, 7 кг значительно меньше, чем максимальная сила истинного покоя  $P_s = 23$  кг.

На графике рис. 4 прямые не проходят через начало координат. Очевидно, на стальных поверхностях образцов имелась пленка постороннего вещества ввиду недостаточной очистки поверхностей перед опытом.

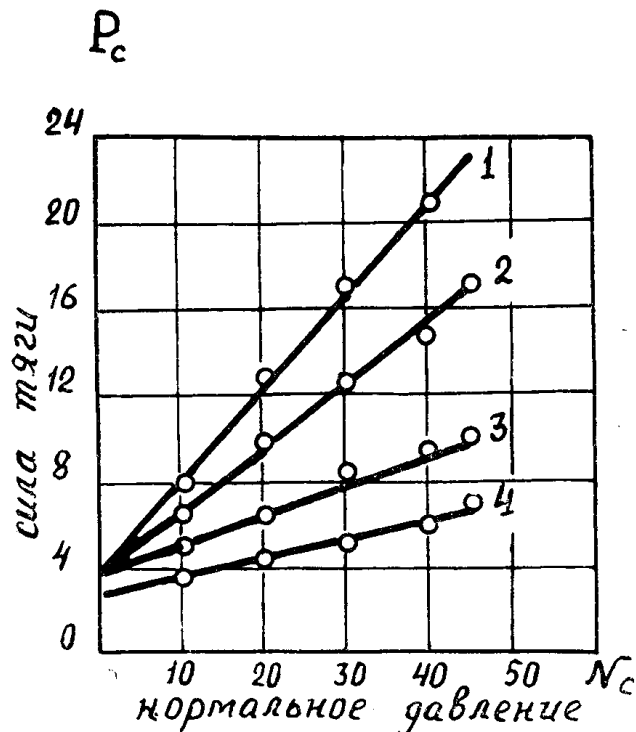


Рис. 4. Одновременное снижение нормальной нагрузки и тянущей силы при неподвижном образце.

Такая адсорбированная пленка всегда имеется на рабочих поверхностях образцов. В опыте рис. 3 образцы притирались друг к другу, и поэтому указанная пленка была притиранием разрушена.

В данном же опыте (рис. 4) образцы не притирались, следовательно, адсорбированная пленка оставалась в сохранности.

В последнем опыте (рис. 4) прямая 4, величина силы  $A$ , несколько снизилась по сравнению с прямыми 1, 2 и 3. Подобные снижения наблюдались также и в других опытах.

Кроме того, наблюдалось такое явление, когда сила  $A$  сначала отсутствует, потом появляется, несмотря на то, что между рабочими поверхностями образцов никаких посторонних веществ в виде пленок не вводилось.

Опыт проводился на материалах: закаленная сталь по цинку. Сила трения определялась путем срыва поверхностей при малых нормальных нагрузках в пределах от 1 до 6 кг. Всего проведено три аналогичных опыта, графики которых в виде прямых 1, 2 и 3 показаны на рис. 5. Все они имеют разные наклоны к оси абсцисс, прямая 3 отсекает на оси ординат величину  $A = 1$  кг.

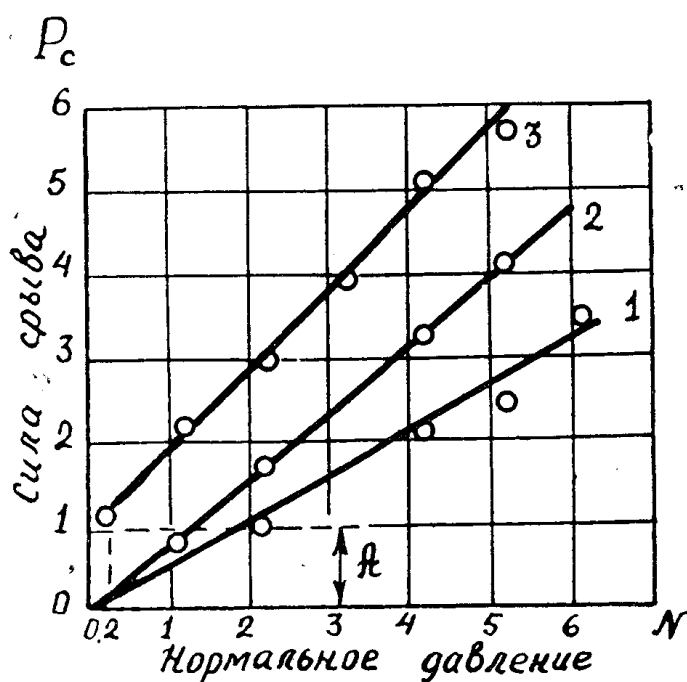


Рис. 5. Изменение силы трения от предварительного нажатия и предварительного смещения.

В первом опыте нормальное давление прикладывалось последовательно от 1 до 6 кг, и в каждом случае образец страгивался с места горизонтальной силой определенной величины, равной силе трения. На графике рис. 5 это отображает прямая 1. По ее наклону к оси абсцисс определяется коэффициент статического трения  $\mu_s = 0,54$ .

Во втором опыте образцы предварительно нагружались нормальным давлением  $N = 45$  кг, освобождались от него, затем определялись силы трения покоя при  $N = 1, 2, 3, 4, 5$  и  $6$  кг, т. е. так же, как и в предыдущем случае. На графике рис. 5 получена прямая 2, расположенная с большим наклоном к оси абсцисс, чем кривая 1. Коэффициент трения покоя равен  $\mu_s = 0,78$ . В этом опыте возрастание коэффициента трения вызвано предварительным нажатием на образцы.

В третьем опыте было сделано предварительное смещение силой  $P_c = 20$  кг при нормальной нагрузке  $N = 45$  кг. Образцы затем были освобождены от этих усилий, и далее опыт проводился аналогично предыдущему.

В результате получена прямая графика 3 рис. 5. Коэффициент статического трения повысился до  $\mu_s = 0,94$ .

Кроме того, появилась постоянная сила  $A = 1$  кг, что видно по непрохождению прямой 3 через начало координат.

В данном случае нельзя предположить, что сила  $A$  обусловлена адгезией, так как ее появлению предшествовало только предварительное смещение, которое не может являться причиной появления прилипания поверхностей. Появление величины  $A$  обусловлено некоторой другой причиной, которую выясним далее.

Прежде следует изложить некоторые положения, вытекающие из работы [1].

После предварительного сдвига образца, находящегося под давлением, в слоях материала контакта появляется внутренняя сила, направленная противоположно предварительному смещению. При удалении смещающей силы она остается внутри материала как бы в заторможенном состоянии. Если теперь образец смещать в обратную сторону, то это происходит с пониженной силой тяги, так как внутренняя сила теперь помогает тянущей силе. Величина внутренней силы может быть определена методом подпора [1]. Если после предварительного смещения удалять тянущую силу и затем постепенно уменьшать нормальное давление, то внутренняя сила высвобождается, а образец стремится двигаться назад. Это явление возврата второго рода.

Если же к образцу приложить встречную силу и наращивать ее так, чтобы образец не двигался, то внутренняя сила будет воспринята на динамометр прибора и может быть определена по своей величине.

Сила, задерживающая образец на месте и равная части освобожденной внутренней силы при снятии доли нормального давления, названа подпирающей силой [1].

Покажем далее опыт, иллюстрирующий значение внутренней силы микросмещения. Опыт проводился на материалах: закаленная сталь по меди.

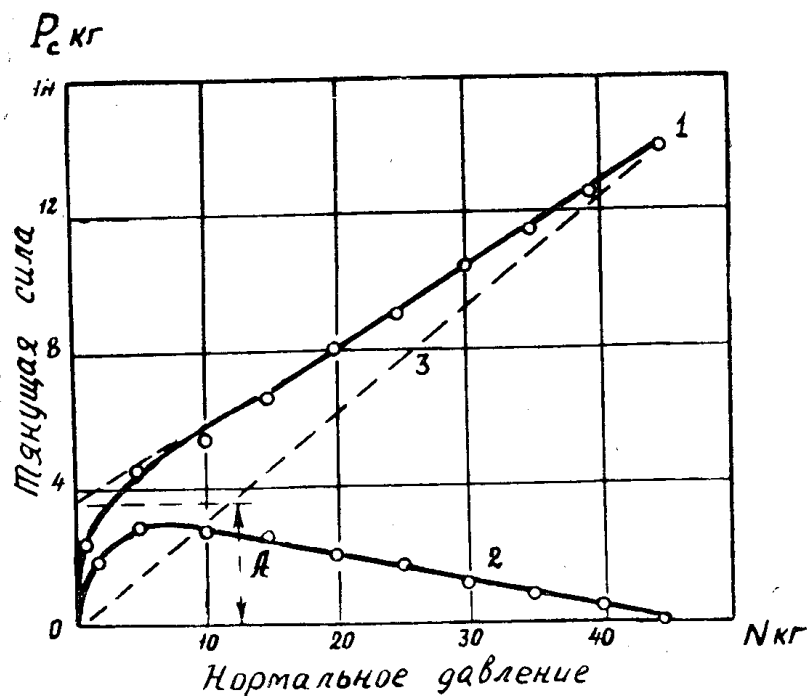


Рис. 6. Ось неподвижности — 1 и ось подпора — 2. Разность ординат их на прямую 3.

Было сделано предварительное смещение силой  $P_c = 14 \text{ кг}^2$  при нормальной нагрузке  $N_c = 45 \text{ кг}$ . После этого производилось одновременное плавное уменьшение обеих сил  $P_c$  и  $N_c$  при неизменном их соотношении. Образец оставался неподвижным. В результате получена кривая рис. 6. Прямую 1, получающуюся при неподвижном

образце путем снятия обеих нагрузок, назовем линией неподвижности.

Далее сделано такое же смещение, как и в предыдущем случае, т. е.  $P_c = 14 \text{ кг}$  и  $N_c = 45 \text{ кг}$ . После удаления тянущей силы постепенно уменьшалось нормальное давление. Для того, чтобы образец не совершал возврата второго рода, постепенно увеличивалась от нуля тянущая сила, направленная противоположно к его движению, то есть производилась операция подпора.

На графике рис. 6 получилась линия 2, являющаяся линией подпора. Обе линии направлены в одну точку на оси ординат и отсекают на ней величину

$$A = 3,5 \text{ кг.}$$

На графике рис. 6 получилась линия 2, являющаяся линией подпора. Обе линии направлены в одну точку на оси ординат и отсекают на ней величину  $A = 3,5 \text{ кг}$ .

Если из ординат графика неподвижности — 1 вычесть соответствующие ординаты линии подпора — 2, то получится прямая — 3, направленная в начало координат

$$P_s = \nu_s N,$$

но так как

$$P_s = P_c - P_t,$$

т. е. только что указанная разность ординат, то уравнение линии 3 графика запишется как

$$P_c - P_t = \nu_s N, \quad (1)$$

где  $\nu_s$  — статический коэффициент трения,  $P_t$  — внутренняя сила. Для линии 2 в ее прямом участке

$$A - P_t = \nu_t N, \quad (2)$$

здесь  $\nu_t$  — коэффициент внутреннего сопротивления, являющийся коэффициентом пропорциональности линии 2. Из совместного решения полученных выражений 1 и 2 найдем

$$\frac{P_c - P_t}{A - P_t} = \frac{\nu_s}{\nu_t} = a,$$

т. е. некоторая постоянная величина.

После некоторых преобразований получим

$$A = \frac{P_c}{a} - \left( \frac{1}{a} + 1 \right) P_t. \quad (3)$$

Последнее уравнение дает зависимость силы  $A$  от величины тянущего усилия и внутреннего сопротивления  $P_t$ .

При

$$P_t = 0$$

$$A = \frac{P_c}{a} = P_c \frac{\nu_t}{\nu_s},$$

но так как в этом случае  $\nu_t$ , являющийся угловым коэффициентом линии 2, тоже равен нулю, то  $A = 0$ .

Таким образом, опыт показывает, что в данном случае величина силы  $A$  обусловлена внутренним торможением элементов контакта при его напряженном состоянии, а не адгезией, как это можно было предположить.



Но адгезия также в иных случаях проявляется, а поэтому закон смещения должен быть выражен уравнением

$$P_c = A_a + A_c + \nu_s N,$$

где  $P_c$  — сила статического смещения;  $A_a$  — постоянная, обусловленная адгезией;  $A_c$  — постоянная, обусловленная внутренним торможением материала, вызванным нормальной нагрузкой,  $\nu_s$  — коэффициент статического трения и  $N$  — величина нормального давления в килограммах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. Р. Ко н я х и н. Стесненная микродеформация сдвига материала поверхности. Известия вузов, МВССО, Механика и машиностроение, № 7, 1961.

---