

А. В. БУЛГАДАЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ МЕЖДУ СИЛОЙ ТРЕНИЯ И «ЭЛЕМЕНТАРНЫМИ СИЛАМИ»

(Представлено академиком М. А. Леонтовичем 5 IV 1954)

Как известно, при соприкосновении твердых поверхностей (несмазанных или при наличии граничной смазки) скольжение возникает только в том случае, когда приложенная тангенциальная сила превосходит силу трения покоя. При меньших тангенциальных силах скольжение не наступает, но происходят весьма малые смещения соприкасающихся поверхностей, так называемые «предварительные смещения». Возникающие при этом силы взаимодействия между соприкасающимися поверхностями уравнивают приложенную внешнюю силу. Область предварительных смещений очень мала — порядка 10^{-5} см и даже меньше. Взаимодействия между соприкасающимися поверхностями, возникающие в области предварительных смещений (мы их для краткости дальше будем называть «элементарными силами»), были детально изучены при помощи динамического метода ⁽¹⁾, предложенного Л. И. Мандельштамом и С. Э. Хайкиным. Оказалось, что при весьма малых смещениях (порядка $10^{-8} \div 10^{-7}$ см) эти силы являются почти чисто консервативными, но нелинейными, причем величина сил растет медленнее, чем смещение. Такой характер зависимости элементарных сил от смещений дал основание предположить, что скольжение наступает после того, как рост этих сил прекращается, и что, следовательно, сила трения покоя — это то наибольшее значение, которое могут достичь элементарные силы. Однако переход от элементарных сил к макроскопической силе трения при помощи динамического метода не может быть надежно прослежен вследствие трудностей, которые возникают в этом методе при увеличении амплитуды смещений более чем до 10^{-6} см. Поэтому вопрос о том, как связаны между собой элементарные силы трения и макроскопическая сила трения покоя, оставался невыясненным. По предложению С. Э. Хайкина мною было предпринято исследование этого вопроса.

Основная идея исследования заключалась в следующем. Если сила трения покоя есть то наибольшее значение, которого могут достичь элементарные силы, то при изменении величины элементарных сил (независимо от того, по какой причине эти изменения происходят), должна соответственно измениться и сила трения покоя и, наоборот, если по какой либо причине изменится сила трения покоя, то одновременно должны происходить соответствующие изменения элементарных сил. При этом, конечно, все прочие условия, от которых зависит сила трения покоя, в частности условия соприкосновения поверхностей, должны оставаться неизменными. Так как сила трения покоя (особенно при малых нагрузках) может заметно изменяться от раза к разу (в силу того, что при каждом новом положении поверхностей условия соприкосновения не воспроизводятся точно), сопоставлять между собой величину элементарных сил и силы трения покоя нужно, не изменяя положения соприкасающихся поверхностей. При этом условии можно ожидать, что связь между

элементарными силами и силой трения покоя, если она существует, выступит наиболее отчетливо.

Однако заранее можно сказать, что этой связи не должно существовать на сильно шероховатых поверхностях, для которых происхождение силы трения покоя может быть объяснено при помощи известной модели двух напильников; в этой модели сила трения покоя зависит только от геометрии поверхностей (и давления) и не может зависеть от характера сил взаимодействия между поверхностями.

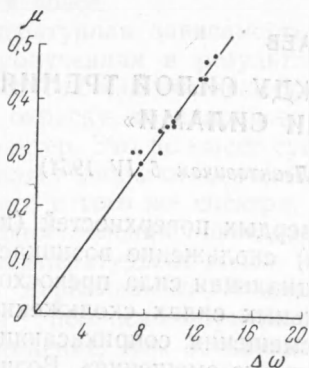


Рис. 1

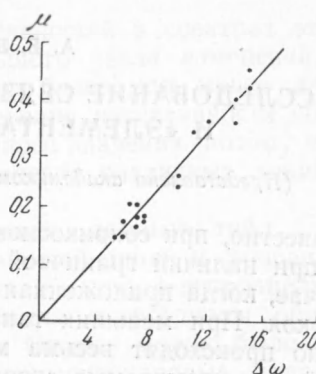


Рис. 2

Поэтому необходимо было выяснить не только, существует ли связь между элементарными силами и силой трения покоя в случае достаточно гладких поверхностей, но и установить, при какой степени шероховатости поверхностей эта связь исчезает. Описанные ниже эксперименты дали исчерпывающий ответ на оба эти вопроса.

Для измерения элементарных сил был использован уже упоминавшийся динамический метод Л. И. Мандельштама и С. Э. Хайкина. Амплитуда колебаний пьезокварца измерялась при помощи интерференционного компаратора ⁽²⁾. Сила трения покоя измерялась по методу предельного угла.

Оба измерения (элементарных сил и силы трения покоя) выполнялись на одних и тех же поверхностях при одинаковом состоянии поверхностей и неизменных условиях соприкосновения. Для этого сначала динамическим методом (при котором не происходит макроскопических смещений соприкасающихся поверхностей) по смещению частоты пьезокварцевого резонатора под действием помещенной на него накладки измерялся коэффициент жесткости элементарных сил, т. е. коэффициент при линейном члене разложения элементарных сил по степеням смещения *. А затем для той же накладки в том же положении измерялся коэффициент трения покоя.

Исследования произведены на парах кварц — стекло, стекло — стекло, кварц — кварц, слюда — слюда, серебро — серебро, серебро — сталь. Стекланные и слюдяные поверхности создавались путем приклеивания к кварцу тонких покровных стекол и листочков слюды, серебряные — покрытием боковой грани кварца слоем серебра методом термического испарения.

Изменение коэффициента трения покоя вызывалось нанесением граничной смазки, очисткой поверхностей спиртом, ионной бомбардировкой (в случае слюдяной накладки вместо очистки применялось также отщепление тонких слоев слюды), увеличением продолжительности контакта между поверхностями, изменением амплитуды колебаний кварца.

* В дальнейшем вместо коэффициента жесткости везде приводится непосредственно измеряемая и пропорциональная коэффициенту жесткости величина — сдвиг частоты $\Delta\omega$.

Оказалось, что для достаточно гладких поверхностей (шероховатость порядка $10^{-6} - 10^{-5}$ см) во всех случаях изменения величины коэффициента трения покоя всегда происходят соответствующие изменения сдвига частоты.

В частности, очистка поверхностей дает одинаковое возрастание как коэффициента трения покоя, так и сдвига частоты кварцевого резонатора, а нанесение слоя поверхностноактивных веществ — обратный эффект. Сдвиг частоты в наших опытах менялся от 2 до 20 гц. Коэффициент трения, соответственно, менялся от 0,07 до 0,7. На рис. 1 и 2 показаны (соответственно, для поверхностей кварц — стекло и слюда — слюда) зависимость между коэффициентом трения покоя μ и жесткостью элементарных сил (или $\Delta\omega$). Каждая точка графика соответствует значениям μ и $\Delta\omega$, измеренным при одних и тех же условиях.

Группы точек соответствуют разной степени частоты поверхностей. Как видно из графика, μ и $\Delta\omega$ изменяются в широких пределах, но отношение их остается постоянным.

Одновременное изменение сдвига частоты и коэффициента трения в зависимости от продолжительности контакта между поверхностями исследовалось на паре кварц — стекло на поверхностях, обработанных ионной бомбардировкой. При этом коэффициент трения в зависимости от продолжительности контакта меняется значительно (в несколько раз). Оказалось, однако, что обе величины изменяются одинаково и отношение между ними остается примерно постоянным.

Помимо очистки поверхностей и изменения времени контакта, был применен еще один метод изменения силы трения покоя. Как показал опыт, при колеблющемся кварце макроскопическая сила трения покоя уменьшается с увеличением амплитуды колебаний кварца. Практически это выражается в том, что для лежа-

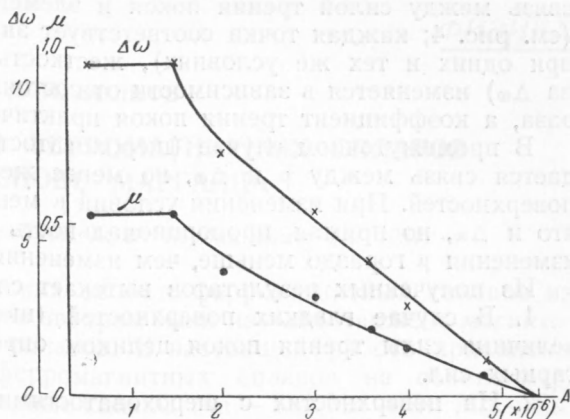


Рис. 3

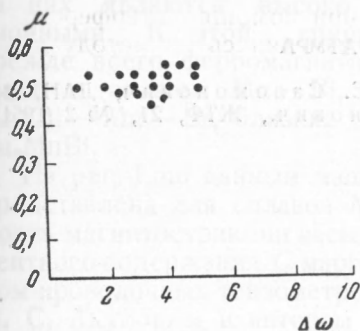


Рис. 4

щей на кварце накладки предельный угол с ростом амплитуды колебаний кварца постепенно уменьшается и при достаточно большой амплитуде падает до нуля. Оказалось, что на достаточно гладких поверхностях (шероховатость порядка $10^{-6} - 10^{-5}$ см) предельный угол и сдвиг частоты при достижении определенных амплитуд ($2 \cdot 10^{-6}$ см) одновременно начинают уменьшаться; при дальнейшем увеличении амплитуды они изменяются «параллельно» и при одних и тех же амплитудах ($6 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-5}$ см) обращаются в нуль (см. рис. 3). Уменьшение коэффициента трения и сдвига частоты с увеличением амплитуды кварца можно объяснить появлением паразитных нормальных колебаний кварца, которые приводят к увеличению среднего расстояния между этими поверхностями. Однако с точки зрения интересующего нас вопроса происхождение самого эффекта имеет второстепенное значение. Важно лишь

то, что и в этом случае, где изменения коэффициента трения и сдвига частоты вызваны заведомо не изменением частоты поверхностей, а другой причиной, существует жесткая связь между коэффициентом трения и сдвигом частоты.

Иные результаты получаются на грубо обработанных поверхностях (шероховатость порядка 10^{-3} см). Оказалось, что на таких поверхностях связь между силой трения покоя и элементарными силами отсутствует (см. рис. 4; каждая точка соответствует значениям μ и $\Delta\omega$, измеренным при одних и тех же условиях), жесткость элементарных сил (величина $\Delta\omega$) изменяется в зависимости от состояния поверхностей почти в три раза, а коэффициент трения покоя практически не меняется.

В промежуточном случае (шероховатости $5 \cdot 10^{-4}$ см) хотя и наблюдается связь между μ и $\Delta\omega$, но менее жесткая, чем в случае гладких поверхностей. При изменении условий μ меняется в том же направлении, что и $\Delta\omega$, но прямая пропорциональность между ними отсутствует — изменения μ гораздо меньше, чем изменения $\Delta\omega$.

Из полученных результатов вытекает следующее:

1. В случае гладких поверхностей (шероховатости $10^{-6} \div 10^{-5}$ см) величина силы трения покоя целиком определяется величиной элементарных сил.

2. На поверхностях с шероховатостями $5 \cdot 10^{-4}$ см величина силы трения покоя лишь частично зависит от величины элементарных сил.

3. На грубых поверхностях (шероховатости 10^{-3} см) не существует связи между силой трения покоя и элементарными силами.

Эти выводы являются весьма убедительным подтверждением представления о том, что на гладких поверхностях (пока шероховатости не маскируют роли элементарных сил) сила трения покоя есть не что иное, как максимальное значение, которого могут достичь элементарные силы.

Физический институт им. П. Н. Лебедева
Академии наук СССР

Поступило
16 I 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ С. Э. Хайкин, Л. П. Лисовский, Л. Е. Саломонович, ДАН, 24, № 2 (1939). ² И. Бородавская, А. Саломонович, ЖТФ, 21, № 2 (1951).