

С. Э. ХАЙКИН, Л. П. ЛИСОВСКИЙ, А. Е. СОЛОМОНОВИЧ

**О СИЛАХ «СУХОГО ТРЕНИЯ»**

(Представлено академиком Л. И. Мандельштамом 26 V 1939)

Силы «сухого трения», т. е. силы, возникающие между соприкасающимися поверхностями твердых тел, проявляются как в том случае, когда соприкасающиеся поверхности скользят одна относительно другой (так называемые силы «трения скольжения»), так и в случае, когда скольжение между соприкасающимися поверхностями еще не наступило (силы «трения покоя»). Ключ к пониманию происхождения сил «трения скольжения» несомненно лежит в изучении природы сил «трения покоя» и в изучении механизма перехода сил «трения покоя» в силы «трения скольжения». Существующие теории сухого трения <sup>(1, 2, 3, 4)</sup> содержат попытки связать между собой эти два типа сил. Все авторы вводят элементарные силы взаимодействия между соприкасающимися поверхностями, причем полагают, что эти силы носят чисто позиционный характер. О характере элементарных сил (зависимости этих сил от смещений) авторы делают различные предположения, но все эти предположения в конечном счете сводятся к тому, чтобы объяснить основные черты «трения покоя» и «трения скольжения» (в частности неконсервативность силы «трения скольжения»). Однако все эти теоретические построения до сих пор остаются гипотетическими, так как почти отсутствуют экспериментальные исследования природы и характера сил «трения покоя» и механизма перехода их в «трение скольжения». Нам известны лишь две работы, посвященные этому вопросу <sup>(5, 3)\*</sup>. Пользуясь различными методами, оба автора обнаруживают позиционные (а потому консервативные) силы при малых смещениях соприкасающихся поверхностей. Однако Ранкин обнаруживал эти консервативные силы при смещениях, достигающих  $8 \cdot 10^{-6}$  см; Томлинсон же пришел к выводу, что силы взаимодействия между смещающимися поверхностями перестают быть консервативными уже при смещениях, во всяком случае меньших чем  $1 \cdot 10^{-7}$  см. Таким образом вопрос о переходе «трения покоя» в «трение скольжения» (сил позиционных в силы неконсервативные) до сих пор остается невыясненным. Трудность в исследовании этого вопроса заключается в том, что переход начинается при столь малых смещениях, наблюдать которые непосредственно (в микроскоп) невозможно. С другой стороны, изучение характера сил взаимодействия между соприкасаю-

\* Появившаяся недавно работа Боудена и Лебена <sup>(6)</sup> о природе трения подтверждает лишь давно известный факт, что трение покоя не может превосходить некоторой величины и что «трение скольжения» в большинстве случаев меньше максимального «трения покоя». Никаких новых указаний по вопросу о переходе «трения покоя» в «трение скольжения» эта работа не дает.

щимися поверхностями при малых статических смещениях или медленных движениях очень затруднено тем, что наряду со смещениями между соприкасающимися поверхностями могут возникать упругие деформации и внутри самих соприкасающихся тел. Упругие силы, возникающие внутри соприкасающихся тел, легко могут замаскировать те силы взаимодействия между поверхностями, которые подлежат исследованию.

Академик Л. И. Мандельштам и один из авторов настоящей работы (С. Э. Хайкин) предложили для исследования сил трения при малых смещениях использовать быстрые механические колебания. Одно из преимуществ этого метода состоит в том, что при больших частотах (поскольку весьма малым смещениям соответствуют уже заметные амплитуды скоростей и значительные амплитуды ускорений) второе тело, соприкасающееся с данным колеблющимся телом, не приходится закреплять, и поэтому исключается опасность возникновения наряду со смещением соприкасающихся поверхностей упругих смещений внутри самих тел. Наиболее пригодными для осуществления этого метода являются колебания пьезокварцевых резонаторов. Благодаря пьезоэффекту в них очень удобно возбуждать быстрые механические колебания. Помещая на поверхность колеблющегося пьезокварцевого резонатора твердое тело, мы вводим новые силы взаимодействия между кварцем и накладкой, которые должны как-то изменять колебательные свойства пьезокварцевого резонатора. Так как пьезокварцевые резонаторы обладают весьма острой кривой резонанса, то форма этой кривой оказывается очень чувствительной даже к самым малым возмущениям, вносимым силами взаимодействия между кварцем и накладкой. По изменению формы резонансной кривой становится возможным судить о характере сил взаимодействия между кварцем и помещенным на него твердым телом при очень малых перемещениях.

Метод этот оказался чрезвычайно простым и удобным. Он легко позволил проникнуть как раз в ту область смещений, где должен происходить переход от консервативных сил к неконсервативным, и хотя эта область полностью еще нами не исследована, но все же полученные результаты позволяют сделать некоторые новые заключения о характере сил взаимодействия между соприкасающимися поверхностями при очень малых смещениях и наметить в общих чертах картину перехода от «трения покоя» к «трению скольжения»\*.

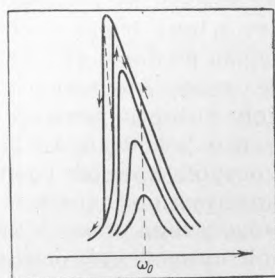
Предложенный метод практически осуществлялся следующим образом: для возбуждения колебаний в пьезокварцевых резонаторах применялся модулируемый ламповый генератор, одна из боковых частот которого могла быть приведена в совпадение с собственной частотой пьезокварцевого резонатора. Такая схема, с одной стороны, позволяла применить стабилизацию генератора и обеспечить таким образом нужную стабильность частоты, воздействующей на кварц; с другой стороны, эта схема исключает обратное воздействие кварца на генератор. Плавным изменением частоты модуляции снимались резонансные кривые пьезокварцевого резонатора без накладок и с накладками различной величины и из разных материалов. Накладки делались из стали, алюминия и третики в виде параллелепипедов размером в несколько миллиметров по грани.

\* Поскольку в наших опытах поверхности не подвергались какой-либо специальной обработке и очистке, можно говорить о соприкосновении твердых тел только в грубом смысле этого слова; соприкосновение тел в наших опытах происходит вероятно в очень небольшой части всей поверхности и при этом существенную роль могут играть различные поверхностные явления (загрязнения, слой воздуха и т. д.).

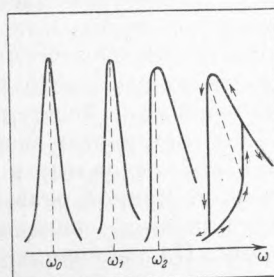
Поэтому наши опыты не позволяют сделать никаких заключений о явлениях, происходящих при плотном контакте очищенных поверхностей твердых тел; но они представляют интерес именно потому, что относятся к случаю, с которым обычно приходится иметь дело на практике.

При помощи добавочной нагрузки можно было изменять давление накладки на кварц, не изменяя ее размеров. Добавочные давления составляли обычно несколько грамм, а иногда несколько десятков грамм. Опыты делались с двумя кварцами на частотах 70 000 и 150 000 Hz.

Очевидно, возможны два типа смещений между соприкасающимися твердыми поверхностями—тангенциальное, которое соответствует макроскопически скольжению поверхностей, и нормальное, которое макроскопически соответствует отрыванию поверхностей друг от друга. При помощи пьезокварцевых резонаторов могут быть реализованы оба эти случая. В первом случае накладка помещается на боковую поверхность колеблющегося по длине кварца, во втором—на торцовую поверхность\*. Несмотря на то, что оба эти случая принципиально, казалось бы, совершенно различны, влияние накладок на характер резонансных кривых пьезокварца в обоих случаях было почти одинаково не только в качественном, но даже



Фиг. 1.



Фиг. 2.

и в количественном отношении. Поэтому все изложенные ниже результаты опытов относятся в одинаковой степени как к тангенциальным, так и к нормальным смещениям.

Основные результаты вкратце таковы: при помещении на кварц накладка из различных металлов и сплавов (сталь, алюминий, третник) резонансная частота кварца всегда повышается, затухание же кварца увеличивается очень незначительно. Резонансная кривая имеет обычный для линейного резонатора вид. Если при неизменном давлении на накладку увеличивать амплитуду колебаний кварца, то наблюдается переход от нормальной кривой резонанса (при малых амплитудах) к несимметричной, а затем в резонансной кривой появляются неоднозначность и срывы (фиг. 1). С другой стороны, при увеличении давления на накладку повышение резонансной частоты (различное для различных материалов) становится все более и более заметным. При дальнейшем увеличении давления помимо увеличения частоты становится заметным искажение (нарушение симметрии) резонансной кривой, а затем (при еще большем давлении) в кривой резонанса появляются неоднозначность и срывы (фиг. 2).

На основании полученных результатов могут быть сделаны следующие общие выводы:

1) Так как накладка повышает резонансную частоту кварца и очень мало увеличивает его затухание, то, значит, силы взаимодействия между поверхностями кварца и накладки эквивалентны добавочному упругому закреплению, т. е. при малых смещениях представляют собой почти чисто позиционные (а потому консервативные) силы.

\* Специальными контрольными опытами было подтверждено, что кварц колеблется действительно по длине и что в первом случае мы имеем дело практически только с тангенциальными смещениями, а во втором только с нормальными.

2) Так как при малых амплитудах колебаний частота смещается, но форма резонансной кривой остается неизменной, то, значит, силы взаимодействия при малых смещениях являются линейными (подчиняются закону Гука). Искажение формы кривой и появление срывов при увеличении амплитуд колебаний показывает, что при увеличении смещений силы взаимодействия перестают быть линейными и это отклонение от линейности таково, что силы растут медленнее, чем смещения (так как «петля» в резонансной кривой лежит со стороны низких частот).

3) Так как при фиксированных амплитудах повышение давления увеличивает смещение частоты и приводит к появлению несимметрии, то, значит, с увеличением давления растет упругость сил взаимодействия между поверхностями и вместе с тем возрастает нелинейность этих сил.

4) Так как при нормальных смещениях наблюдаются те же явления, что и при тангенциальных, то, значит, силы взаимодействия между смещающимися поверхностями в обоих случаях имеют одинаковый характер.

Величины относительных смещений поверхностей не могут быть измерены непосредственно. Однако, как показывают простые подсчеты, в обоих случаях (тангенциальных и нормальных смещений) накладка практически остается неподвижной\* и, значит, амплитуды относительных смещений поверхностей совпадают с амплитудами колебаний пьезокварца. Эти последние могут быть примерно определены косвенными методами (по напряжениям на обкладках кварца). В наших опытах эти амплитуды лежат в пределах от  $1 \cdot 10^{-6}$  до  $1 \cdot 10^{-5}$  см.

Таким образом можно считать доказанным, что при смещениях порядка  $1 \cdot 10^{-6}$  см (конечно для различных тел эта величина оказывается несколько различной) силы взаимодействия между соприкасающимися поверхностями носят почти чисто упругий характер,—это область «трения покоя». При увеличении смещений силы эти перестают быть линейными и растут медленнее, чем растут смещения. Если в дальнейшем рост сил все больше и больше замедляется и наконец вовсе прекращается, то это очевидно должно привести к возникновению скольжения (при тангенциальных смещениях) или к отрыву (при нормальных смещениях). Поэтому появление заметной нелинейности в силах взаимодействия (именно все большее и большее замедление роста сил) может повидимому служить признаком приближающегося начала скольжения. Дальнейшее увеличение амплитуд колебаний скоро должно было бы привести к возникновению скольжения, которое сказалось бы в виде резкого увеличения затухания кварца (по крайней мере в случае тангенциальных смещений). К сожалению нам еще не удалось проследить при помощи нашего метода всей этой области перехода к скольжению (так как возникли некоторые практические затруднения при получении больших амплитуд колебаний кварца), но специальные эксперименты, проведенные попутно другим методом\*\*, подтверждают, что те наибольшие смещения, которым соответствуют наши искаженные кривые резонанса, лежат уже именно в области перехода от «трения покоя» к «трению скольжения». Этот другой метод заключался в измерении предельного угла трения для накладки, лежащей на колеблющемся кварце. Если между поверхностями кварца и накладки уже существует скольжение (при тангенциальных смещениях), то «трение покоя» должно отсутствовать и предельный угол должен быть равен нулю. Точно так же при

\* Размеры накладок малы по сравнению с длиной упругой волны, которая должна в них возбуждаться при частоте в 150 000 Hz (а тем более при частоте в 70 000 Hz), поэтому наклейки могут двигаться только как целое. Но, с другой стороны, масса накладок для этих частот уже столь велика по сравнению с упругостью сил взаимодействия между поверхностями, что наклейки практически остаются неподвижными.

\*\* Опыты были проведены студентом Брандт.

нормальных смещениях, если происходит отрыв поверхностей, предельный угол также должен быть равен нулю. Таким образом переход к скольжению или к отрыву должен сопровождаться уменьшением предельного угла трения. Как показал опыт, именно при тех больших амплитудах, которым соответствуют наши искаженные резонансные кривые, начинается быстрое уменьшение предельного угла. Следовательно в одной и той же области смещений происходит переход от упругих зацеплений к скольжению (или к отрыву), и вместе с тем становится заметным отклонение от линейности в силах взаимодействия между поверхностями. Несомненно это отклонение от линейности (более медленный рост сил, чем смещений) и является причиной возникновения скольжения или отрыва.

Мы рассчитываем, что разработанный нами метод позволит в дальнейшем изучить более детально характер сил трения покоя и проследить механизм перехода «трения покоя» в «трение скольжения».

Лаборатория колебаний  
Научно-исследовательского института физики  
Московского государственного университета.

Поступило  
26 V 1939.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Prandtl, ZS. f. angew. Mat. und Mech., 85—106 (1928). <sup>2</sup> Френкель, ZS. f. Phys., 37 (1926). <sup>3</sup> Tomlinson, Philosophical Mag., № 7 (1929). <sup>4</sup> Derjagin, ZS. f. Phys., 88 (1934). <sup>5</sup> Rankin, Philosophical Mag., VIII (1926). <sup>6</sup> Bowden a. Leben, Proc. of the Roy. Soc., 169 (1939).