

Б. К. ШЕМБЕЛЬ

О ПРИРОДЕ ДИССИПАТИВНЫХ СИЛ ПРИ МАЛЫХ СМЕЩЕНИЯХ СОПРИКАСАЮЩИХСЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ

(Представлено академиком Н. Н. Семеновым 23 / 1948)

1. Как известно, силы взаимодействия между двумя соприкасающимися поверхностями твердых тел при очень малых (доли микрона) их взаимных смещениях имеют комплексный характер ⁽¹⁾.

Известно также, что упругая (консервативная) компонента этих сил в известных пределах прямо пропорциональна величине силы, сжимающей поверхности (вертикальной силе) ⁽²⁾, а также, что неупругая (диссипативная) компонента возрастает как с увеличением вертикальной силы, так и с увеличением смещений ⁽¹⁾.

С. Э. Хайкин ⁽¹⁾ экспериментально установил, что величина и характер сил взаимодействия при малых смещениях одинаковы как при тангенциальных, так и при нормальных смещениях; отсюда он делает вывод, что поле сил взаимодействия должно иметь приблизительно шаровую форму.

Для объяснения природы диссипативной компоненты в нашем случае нельзя применить обычные представления о силах трения скольжения, поскольку последнее отсутствует. Также трудно предположить наличие пластических деформаций, так как при этом не имела бы места та обратимость взаимодействия, которая была установлена Ранкиным ⁽²⁾.

Если закономерность для консервативной компоненты можно понять и объяснить, исходя из современных представлений о контакте между двумя шероховатыми поверхностями, то для природы диссипативной компоненты сил взаимодействия в настоящее время, насколько автору известно, нет объяснений.

При изучении потерь энергии, имеющих место в точках механического контакта колеблющегося пьезокварца с жесткими опорами, мной была обнаружена закономерность, которая может способствовать объяснению природы этих потерь, а следовательно, и природы диссипативной компоненты сил взаимодействия при малых смещениях.

Пьезокварц, применяемый в радиотехнике для стабилизации частоты колебаний высокочастотных ламповых генераторов и в селективных цепях (электрические фильтры), имеет форму брусков или пластинок, механически зажатых вблизи узловой линии колебаний между двумя или несколькими металлическими упорами. Это зажатие вносит дополнительное затухание кварца, обусловленное диссипативной компонентой сил взаимодействия в местах зажатия, а также изменение частоты, вызываемое консервативной компонентой их. Поэтому, изучая изменение затухания и частоты при изменении условий зажатия кварца, можно составить представление о закономерностях для обеих указанных компонент в отдельности. Такой метод был применен С. Э. Хайкиным для кварцев, возбуждаемых внешней силой.

В опытах автора кварц был использован в схеме автогенератора, и при изучении диссипативной компоненты измерялось не затухание, а сопротивление электрического контура, эквивалентного кварцу⁽³⁾. Такой метод обладает большей точностью и экспериментально весьма прост.

У многих типов кварцев затухание, вносимое зажатием, составляет 200—300% от их собственного затухания. Поэтому уже небольшие относительные изменения величины диссипативных сил взаимодействия резко сказываются на общем затухании или на эквивалентном сопротивлении кварца. Это обстоятельство обуславливает кажущуюся неопределенность эффекта зажатия кварца, так как ничтожные перекосы зажимающих упоров или небольшие их смещения в сторону от узловой линии колебаний, приводящие к изменениям в распределении вертикальной силы по контактирующей поверхности

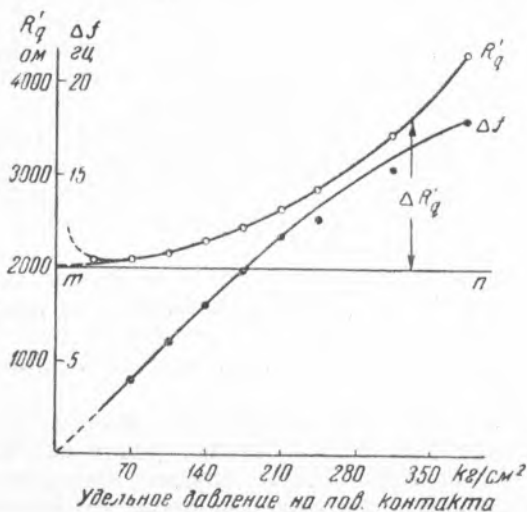


Рис. 1

колеблющейся в плоскости большой грани в режиме колебаний сдвига (размеры пластинки: 30×30×2 мм). Изменение консервативной компоненты сил взаимодействия характеризуется изменением частоты (кривая Δf); изменение диссипативной компоненты — изменением сопротивления (кривая R'_q).

Кривая Δf при малых усилиях зажатия близка к прямой линии.

Кривая R'_q хорошо аппроксимируется параболой второго порядка, которая, будучи продолжена до пересечения с осью ординат в точке m , позволяет установить собственное сопротивление кварца (2000Ω). Приращения сопротивления $\Delta R'_q$, лежащие выше прямой m , обусловлены диссипативной компонентой сил взаимодействия.

На рис. 2 показано несколько зависимостей $\sqrt{\Delta R'_q} = F(\sigma)$, полученных для различных случаев зажатия. Мы видим, что эти зависимости достаточно близки к линейным. В этих опытах максимальные взаимные смещения контактирующих поверхностей, имевшие место на их периферии, имели величину порядка 10—20Å.

Поверхность кварца была обработана очень мелким наждачным порошком, применяемым при шлифовке в кварцевом производстве, и покрыта (гальванически) слоем никеля толщиной порядка 1μ. Стальные (некаленая сталь) зажимающие упоры имели контактирующие поверхности, обработанные тем же наждаком. Были приняты меры к тому, чтобы контактирующие поверхности упоров были плоскими.

2. При соприкосновении двух шероховатых поверхностей твердого вещества действительный контакт имеет место лишь в отдельных точках — на гребешках шероховатостей. Действительная площадь соприкосновения поверхностей определяется только величиной сжимающей силы и пределом текучести их материалов (4). Таких представлений придерживаются, например, при расчете электрического сопротивления контакта и в других случаях.

Это представление позволяет объяснить закономерность для консервативной компоненты изучаемых сил в функции вертикальной силы, так как упругая связь двух тел естественно должна быть пропорциональна действительной площади их соприкосновения.

Если на данную точку соприкосновения i приходится вертикальная сила Y_i , то действительная площадь контакта в этой точке будет

$$q_i = Y_i / \sigma_T,$$

где σ_T — предел текучести материала, наиболее мягкого из двух соприкасающихся тел.

Полная действительная площадь соприкосновения

$$q = \frac{1}{\sigma_T} \sum Y_i = Y / \sigma_T$$

прямо пропорциональна вертикальной силе Y .

Наблюдаемая квадратичная зависимость диссипативной компоненты может быть хорошо объяснена, если сделать предположение, что она является результатом излучения упругих волн из каждой точки соприкосновения в твердое вещество поверхностей.

Как известно (5), сопротивление излучения точечного излучателя, размеры коего малы по сравнению с длиной волны звука в веществе, пропорционально квадрату площади излучателя:

$$r_i = \frac{\rho}{4\pi c} \omega^2 q_i^2,$$

где ρ — плотность вещества, c — скорость распространения звука в нем, ω — угловая частота колебаний.

Полное сопротивление излучения для всей контактирующей поверхности

$$R = \frac{\rho \omega^2}{4\pi c^2} \sum Y_i^2.$$

Предполагая функцию распределения вертикальной силы по отдельным контактирующим точкам симметричной и обозначая через Y_{i0} среднее значение вертикальной силы для точек соприкосновения, имеем:

$$Y_i = Y_{i0} \pm \Delta Y_i, \quad \sum Y_i^2 = \frac{Y^2}{n} + \sum \Delta Y_i^2,$$

где n — число точек соприкосновения.

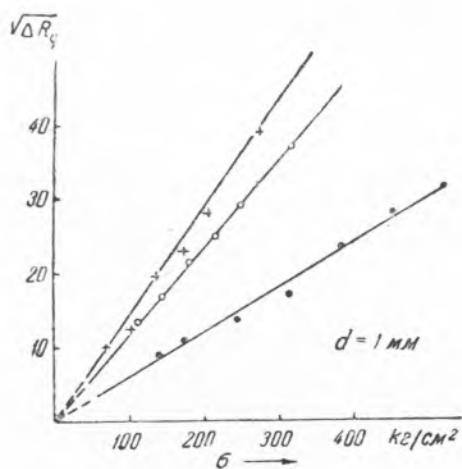


Рис. 2

Тогда

$$R = \frac{\rho \omega^2}{4\pi c \tau_f^2 n} Y^2 \left[1 + n \sum (\Delta Y_i / Y)^2 \right].$$

Таким образом, если при изменении вертикальной силы не изменяется ее функция распределения и остается постоянным число точек соприкосновения, то диссипативная компонента сил взаимодействия оказывается пропорциональной квадрату вертикальной силы.

Предположение об излучении упругих волн как о физическом явлении, обуславливающем диссипативную компоненту сил взаимодействия при малых смещениях, подтверждает также вывод С. Э. Хайкина о шаровой форме поля этих сил.

Поступило
24 XII 1947

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ С. Хайкин, Доклады конференции по трению АН СССР, 1, 488, 1939. ² J. R a p k i n, Phil. Mag., 8, 806 (1926). ³ Б. Шембель, ЖТФ, 17, 3, 349 (1947). ⁴ F. P. B o w d e n and D. T a b o r, Proc. Roy. Soc., 169, 938, 391 (1939). ⁵ А. Харкевич, Теория электроакустических аппаратов, 1940, стр. 325.