

01;05.1

©1995

О НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ФОНОННОГО ВКЛАДА В СИЛУ ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ УПРУГИХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

В. Л. Попов

Одним из факторов, определяющих величину коэффициента трения, является возбуждение фононов при взаимодействии поверхностей трения на атомном уровне. Ниже мы покажем, что при низких температурах фононный вклад в коэффициент трения отсутствует в силу квантово-механической природы элементарных возбуждений в твердом теле. Этот эффект совершенно аналогичен явлению сверхтекучести и имеет ту же физическую природу. Описанный ниже эффект указывает на то, что обычные "классические" подходы к трению могут оказаться неточными и что для анализа процессов трения следует привлекать квантово-механические идеи.

Хорошо известно, что условие наличия сверхтекучести (невозможности рождения элементарных возбуждений в движущейся среде при ее контакте с внешней поверхностью) сводится к требованию, чтобы кривая $\epsilon = \epsilon(p)$, описывающая закон дисперсии элементарных возбуждений в среде, не касалась оси абсцисс. К сверхтекучести приведет поэтому всякий спектр, в котором достаточно малые возбуждения являются фононами [1, стр. 113]. Если существование такого спектра в бозе-жидкости является нетривиальным фактом, являющимся следствием тождественности атомов жидкости и определенных свойств перестановочной симметрии бозе-частиц, то для упругих тел такой вид спектра является тривиальным и общеизвестным фактом. Но это значит, что при движении одного абсолютно гладкого упругого тела по другому, даже при наличии их взаимодействия, рождение элементарных возбуждений невозможно.

Следуя стандартной логике теории сверхтекучести, мы приходим к выводу, что при абсолютном нуле температуры два абсолютно гладких упругих тела должны скользить друг по другу без трения, т. е. должен наблюдаться своего рода эффект "сверхскольжения" (по аналогии со сверхтекучестью).

При конечных температурах среда содержит элементарные возбуждения — "газ квазичастиц", движение которого

сопровождается переносом некоторой массы, так что средду оказывается возможным рассматривать как "смесь" нормальной и сверхтекучей "частей" [1, с. 115]. Для линейного спектра фононов плотность нормальной компоненты, связанной с возбуждениями одной фононной ветви, как известно, равна [1, с. 116]

$$\rho_n = \frac{2\pi^2(kT)^4}{45\hbar u^5}, \quad (1)$$

где u — скорость звука, соответствующая данной ветви спектра, k — постоянная Больцмана, \hbar — постоянная Планка, T — температура.

По мере повышения температуры все большая часть среды становится нормальной и при некоторой критической температуре T^* свойство "сверхскольжения" должно полностью исчезнуть. Оценим критическую температуру T^* для некоторых веществ. В таблице приведены продольная (u_{\parallel}) и поперечная (u_{\perp}) скорости звука в кристаллических твердых тела, их плотность ρ и критическая температура T^* , при которой суммарная плотность нормальных компонент, обусловленных всеми тремя фононными ветвями (причем вклад каждой ветви вычисляется по формуле (1)), должна была бы сравняться с полной плотностью среды.

	$u_{\parallel}, \frac{m}{c}$	$u_{\perp}, \frac{m}{c}$	$\rho, \frac{kg}{c^3}$	T^*, K
Al	6260	3080	2700	406
Fe	5850	3230	7880	562
Cu	4700	2260	8930	372
Ni	5630	2960	8900	521
Sn	3320	1670	7290	242
Pb	3600	1590	11350	255
Алмаз	18000	12000	3510	2342

Мы видим, что при комнатной температуре все приведенные вещества, за исключением Sn и Pb, должны находиться в "сверхскользящем" состоянии, если, конечно, предполагать выполнимость формулы (1) вплоть до указанных температур, а также допустить отсутствие неупругих процессов.

Количественная формула (1), конечно, неприменима вблизи точки фазового перехода в нормальное состояние, где концентрация квазичастиц становится большой, так что само понятие о них в значительной степени теряет смысл. Вторая причина неприменимости формулы (1) при высоких температурах состоит в том, что линейный закон дис-

персии, в предположении которого получена формула (1), справедлив только для импульсов, много меньше дебаевского, соответственно формула (1) может использоваться только при температурах много ниже дебаевской. По указанным причинам вычисленные с помощью (1) значения критических температур T^* имеют только смысл оценок по порядку величины. Они призваны проиллюстрировать мысль, что упругие тела даже при сравнительно высоких температурах являются сугубо квантовыми объектами (в смысле возбуждения в них внутренних движений).

Подчеркнем, что между спектром бозе-жидкости, приводящим к сверхтекучести, и фононным спектром кристалла имеется одно принципиальное различие: в фононном спектре кристаллов возбуждения характеризуются не импульсом, как в жидкости, а квазиимпульсом. Это различие имеет принципиальное значение для рассматриваемого вопроса, поскольку при рассеянии фононов с достаточно большими квазиимпульсами друг на друга оказываются возможными так называемые процессы переброса, происходящие с изменением квазиимпульса на вектор обратной решетки. Наличие процессов переброса означает когерентное взаимодействие элементарных возбуждений с кристаллом как целым. Их наличие поэтому должно приводить к взаимодействию нормальной и сверхтекучей компонент.

Однако при низких температурах (много меньших температуры Дебая), когда возбуждены фононы только с малыми квазиимпульсами, вероятность процессов переброса экспоненциально мала и фононный вклад в силу трения между сверхтекучей и нормальной компонентами убывает экспоненциально при $T \rightarrow 0$.

Все изложенные соображения могут быть отнесены без оговорок только к диэлектрическим кристаллам. В металлах ситуация осложняется тем, что возможно рассеяние фононов на носителях заряда. Взаимодействие последних с идеальной решеткой, в свою очередь, определяется процессами переброса и носит принципиально различный характер в кристаллах с открытыми и закрытыми поверхностями Ферми [2].

К сделанным выше оговоркам следует добавить еще одну. Реальные материалы, разумеется, никогда не являются абсолютно упругими. Наличие свойства пластичности, как показано в [3], приводит к наличию "возбуждений" с нулевыми частотами, что разрушает свойство сверхтекучести.

Даже беглый обзор процессов возбуждения в твердом теле при трении и взаимодействия "газа возбуждения" с "решеткой в целом" показывает, что на процесс трения решающим образом могут оказывать влияние такие, казалось бы, сугубо "объемные" факторы, как характер фононного спек-

тра, температура, характер электронного спектра и вид поверхностей Ферми. Влияние многих из этих факторов на процесс трения в литературе по трибологии даже не обсуждается.

Список литературы

- [1] *Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П.* Статистическая физика. Ч. 2. М.: Наука, 1978. 448 с.
- [2] *Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П.* Физическая кинетика. М.: Наука, 1979. 528 с.
- [3] *Попов В.Л.* // ФММ. 1994. Т. 77. В. 3. С. 5-20.
- [4] *Киреенко О.Ф.* // Трение и износ. 1993. Т. 14. В. 1. С. 85-97.

Институт физики прочности
и материаловедения
СО РАН
Томск

Поступило в Редакцию
27 декабря 1994 г.
В окончательной редакции
3 июля 1995 г.
