

05.4

## Об эффекте уменьшения силы трения при переходе в сверхпроводящее состояние

© С.Ш. Рехвиашвили

Кабардино-Балкарский государственный университет, Нальчик  
E-mail: rsergo@mail.ru

Поступило в Редакцию 3 июня 2003 г.

В окончательной редакции 15 июля 2003 г.

Дается простое объяснение эффекту уменьшения силы трения адсорбированной пленки газа о поверхность металла при его переходе в сверхпроводящее состояние. Отмечено, что сила трения при уменьшении температуры ниже критической должна иметь характерный экстремум, соответствующий равенству теплоемкостей сверхпроводящей и нормальной фаз.

В работе [1] было впервые показано, что для исследования процесса трения можно использовать метод кварцевого микробаланса (КМ) (от англ. quartz microbalance technique). Ранее этот метод использовался для контроля роста тонких пленок и измерения атмосферной влажности; его идея заключается в том, что в результате адсорбции из газовой фазы происходит сдвиг резонансной частоты специального кварцевого резонатора, зависящий от массы адсорбируемого вещества. Возможность применения метода КМ для измерения силы трения обусловлена тем, что при колебании кварцевого резонатора в газовой среде вместе со сдвигом резонансной частоты происходит изменение добротности, связанное с трением газа о поверхность твердого тела. При этом характерные время скольжения и касательное напряжение определяются следующими выражениями:

$$t_0 = (4\pi\Delta f_0\Delta Q)^{-1}, \quad \tau = \frac{\rho v}{t_0},$$

где  $\Delta f_0$  — сдвиг частоты,  $\Delta Q$  — изменение добротности,  $\rho$  — поверхностная плотность адсорбированного вещества,  $v$  — скорость скольжения.

В работе [2] методом КМ измеряли силу трения, действующую на слой молекул азота, адсорбированный на поверхности чистого свинца, при понижении температуры ниже точки перехода свинца в сверхпроводящее состояние  $T < T_c$  (для свинца  $T_c = 7.2$  К). В эксперименте наблюдалось резкое уменьшение силы трения. Авторы [2] высказали предположение о возможной роли электрон-фононного взаимодействия. В работе [3] рассмотрен электронный вклад в трение. Было отмечено, что в рамках электронного механизма скачкообразное уменьшение силы трения объяснить невозможно из-за непрерывного изменения числа электронов, переходящих в сверхпроводящее состояние. В работе [4] высказывались предположения о влиянии структуры адсорбированной пленки азота и роли флуктуационно-электромагнитного взаимодействия. В целом же однозначная физическая интерпретация данного эффекта до сих пор отсутствует.

Эффект уменьшения силы трения при переходе в сверхпроводящее состояние можно очень просто объяснить на основе общих термодинамических рассуждений. Изменение энергии Гиббса сверхпроводника при переходе в отсутствие внешнего магнитного поля дается уравнением Гортера–Казимира [5]:

$$G_n - G_s = \frac{VB_c^2}{2\mu_0}, \quad (1)$$

где индексы  $n$  и  $s$  означают нормальное и сверхпроводящее состояния,  $V$  — объем сверхпроводника,  $B_c$  — критическое значение модуля вектора магнитной индукции,  $\mu_0 = 12.57 \cdot 10^{-7}$  Н/м — магнитная постоянная. Соответствующее изменение касательного напряжения можно определить как производную (1) по объему сверхпроводника

$$\tau_n - \tau_s = \frac{d}{dV} (G_n - G_s) = \frac{B_c^2}{2\mu_0} + \frac{VB_c}{\mu_0} \frac{dB_c}{dV} = \frac{B_c^2}{2\mu_0} + \frac{S_s - S_n}{\alpha_T^{(V)} V}, \quad (2)$$

$$S_s - S_n = \frac{VB_c}{\mu_0} \frac{dB_c}{dT}, \quad \alpha_T^{(V)} = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT},$$

где  $S_s - S_n$  — изменение энтропии,  $\alpha_T^{(V)}$  — температурный коэффициент объемного расширения сверхпроводника. В точке перехода в сверхпроводящее состояние имеем  $T = T_c$ ,  $B_c = 0$  и  $S_s - S_n = 0$ , поэтому  $\tau_n - \tau_s = 0$ . Уменьшению касательного напряжения при  $T < T_c$

соответствует условие

$$\frac{dB_c}{dV} < -\frac{1}{2} \frac{B_c}{V}. \quad (3)$$

Интегрируя неравенство (3) и учитывая параболическую температурную зависимость для  $B_c$ , получаем

$$V_0 > 0, \quad (4)$$

где  $V_0$  — объем сверхпроводника при  $T = 0$ . Условие (4) выполняется всегда, следовательно при любой температуре ниже  $T_c$  разность  $\tau_n - \tau_s > 0$ . Все это хорошо согласуется с экспериментом [2]. В силу теоремы Нернста при  $T = 0$  для разности энтропий имеем  $S_s - S_n = 0$ . Это означает, что в интервале от 0 до  $T_c$  разность касательных напряжений должна иметь характерный экстремум. При этом его положение, очевидно, должно соответствовать точке, в которой теплоемкости сверхпроводящей и нормальной фаз равны. Наличие такого экстремума следует и из эксперимента [2], хотя авторы его никак не объясняют. Тем не менее для более надежного подтверждения этого факта необходимо проведение измерений на разных материалах в широком температурном диапазоне.

Проведем теперь численные оценки. В пределе при  $T \rightarrow 0$  из (2) следует выражение

$$\tau_n - \tau_s = \frac{B_0^2}{2\mu_0}, \quad (5)$$

где  $B_0$  — критическое значение модуля вектора магнитной индукции при  $T = 0$ . Если силу трения определить как критическую силу, требуемую для разъединения контакта площадью  $\Omega$ , то для изменения этой силы при переходе в сверхпроводящее состояние из (5) получим

$$\Delta F = F_n - F_s = \frac{B_0^2 \Omega}{2\mu_0}. \quad (6)$$

Для одиночного атома и свинцового образца при  $\Omega \sim 0.01 \text{ nm}^2$  и  $B_0 = 8.03 \cdot 10^{-2} \text{ Т}$  [5] получаем  $\Delta F \approx 0.3 \cdot 10^{-16} \text{ Н}$ . Данную оценку можно считать вполне достоверной, так как по порядку величины она совпадает с экспериментальным значением тормозящей силы, действующей на атом инертного газа вблизи поверхности образца в нормальном состоянии [4]. Что касается измеренных в [2] абсолютных

значений касательного напряжения, то они представляются чрезмерно малыми — при переходе из нормального состояния в сверхпроводящее происходило изменение от 0.5 до 0.2 Па. В аналогичных экспериментах по измерению силы трения с помощью сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) при скольжении нанозонда по поверхности образца наблюдаются касательные напряжения от единиц до сотен МПа [6]. Такая существенная разница, по-видимому, связана с тем, что в КМ- и СЗМ-экспериментах действуют различные механизмы трения. Определение этих механизмов в настоящее время является актуальной теоретической задачей [4]. В связи с этим отметим, что значительный интерес представляет измерение силы трения на сверхпроводниках (при наличии и отсутствии внешнего магнитного поля) с помощью сверхвысоковакуумного низкотемпературного СЗМ. Насколько известно, такие измерения еще не проводились.

## Список литературы

- [1] *Widom A., Krim J.* // Phys. Rev. B. 1986. V. 34. P. 3.
- [2] *Dayo A., Alnasrallah W., Krim J.* // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 80. P. 1690.
- [3] *Persson B.N.J., Tosatti E.* // Surf. Sci. 1998. V. 411. P. 855.
- [4] *Дедков Г.В.* // УФН. 2000. Т. 170. № 6. С. 585.
- [5] *Литтон Э.* Сверхпроводимость. М.: Мир, 1971.
- [6] *Carpick R.W., Salmeron M.* // Chem. Rev. 1997. V. 97. P. 1163.