

01;05

Трибоспектроскопическое исследование пары сталь—сталь

© В.Л. Попов, Я. Старчевич

Берлинский технический университет, Германия

Поступило в Редакцию 22 ноября 2004 г.

Экспериментально исследована зависимость силы трения между стальной пластиной и стальным образцом, осциллирующим с частотой порядка 60–70 kHz, как функция амплитуды осцилляций. Статическая сила трения быстро убывает в интервале амплитуд колебаний от нуля до $0.1 \mu\text{m}$ и затем демонстрирует только незначительное убывание до амплитуд порядка $0.5 \mu\text{m}$. Для теоретической интерпретации экспериментальных результатов рассматривается модель, в которой два тела, связанных жесткой быстро осциллирующей связью, движутся в случайном потенциале. Анализ модели показывает, что амплитуда осцилляций, при которой наблюдается качественное изменение зависимости силы трения от амплитуды осцилляций, соответствует пространственному масштабу, дающему основной вклад в силу трения. Таким образом, мы приходим к выводу, что в паре сталь—сталь сила трения берет начало на масштабном уровне порядка 50 nm.

1. Введение. Для формулировки адекватных моделей трения и износа важно знать характерный масштабный уровень, на котором протекают процессы, ответственные за формирование силы трения. Зачастую выделение такого определяющего масштаба оказывается нетривиальным, поскольку (i) процессы в зоне трения не доступны непосредственному экспериментальному исследованию, (ii) макроскопическая сила трения не чувствительна к пространственному масштабу, на котором формируется сила трения¹; таким образом, реконструкция микроскопического потенциала взаимодействия по макроскопической силе трения невозможна. Несмотря на бурное развитие физики трения в последние 15 лет характерный масштаб, дающий основной вклад в силу трения, до сих пор не известен для большинства представляющих интерес трибологических материалов.

¹ Этот тезис может быть проиллюстрирован моделью Томлинсона [1]. В этой модели в пределе большого затухания макроскопическая сила трения не зависит от периода потенциала взаимодействия, формирующего силу трения.

В работах [2–4] было теоретически показано, что микроскопический потенциал взаимодействия, ответственный за формирование силы трения, может быть восстановлен по зависимости статической силы трения в паре, одно из тел которой осциллирует с высокой частотой. Было показано, что сила трения покоя при наличии высокочастотных колебаний зависит от амплитуды колебаний. Сила трения при заданной амплитуде колебаний дает информацию о компонентах потенциала взаимодействия с длиной волны порядка амплитуды колебаний. Измеряя силу трения как функцию амплитуды колебаний, мы получаем информацию о всем спектре потенциала взаимодействия в интервале длин волн, соответствующих интервалу изменения амплитуды колебаний осциллирующего тела. Эти идеи лежат в основе метода „трибоспектроскопии“ поверхностей трения. Целью данной работы было экспериментальное исследование зависимости силы трения от амплитуды колебаний и сравнение результатов с теоретическими предсказаниями с целью получения информации о пространственном масштабе, дающем основной вклад в силу трения.

2. Экспериментальная установка и результаты. Основным измерительным элементом экспериментальной установки являлся образец, контактирующий на концах с опорной пластиной (рис. 1). Встроенные в середине образца пьезоэлементы позволяли изменять его длину путем приложения переменного напряжения с частотой 60–70 kHz. Точное значение частоты соответствовало собственной частоте образца; это позволяло достигать амплитуд колебаний порядка $1 \mu\text{m}$. Используемый контроллер автоматически подстраивал частоту к резонансной. Амплитуда колебаний $\Delta l/2$ одной из боковых сторон образца измерялась лазерным виброметром, работающим на основе эффекта Доплера (частота считывания информации 1 MHz). Полная амплитуда

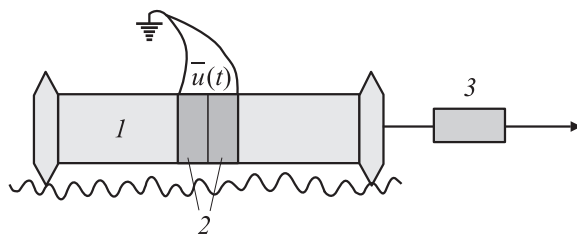


Рис. 1. Измерительный образец (схема): 1 — вибратор, 2 — пьезоэлементы, 3 — силовой сенсор.

колебаний (Δl) предполагалась равной удвоенному значению амплитуды колебаний одного торца. Образец перемещался вдоль опорной пластины с помощью мягкой пружины. Для предотвращения скачков при достижении критической силы трения покоя в конструкции пружины использовался демпфирующий материал. Отдельный эксперимент состоял в протягивании образца на расстояние порядка 10 см и измерении силы натяжения пружины как функции времени. Измеренная сила является случайной функцией времени. Так же как и при теоретическом анализе (см. следующий раздел), вычислялся средний квадрат силы трения в течение всего времени эксперимента. Полученные значения усреднялись по 5 измерениям с одинаковой амплитудой. Отметим, что для случайных сил средний квадрат составляет 0.5 от средней статической силы трения, определяемой как предельное значение силы трения при малых скоростях скольжения. Таким образом, измеряемая величина непосредственно связана с силой трения покоя осциллирующего образца. Средняя скорость скольжения (скорость протяжки) выбиралась достаточно малой, чтобы зависимость от скорости отсутствовала (обычно порядка 0.25–0.5 mm/s). Эта скорость всегда была намного меньше скорости осцилляций (7–250 mm/s).

Типичная экспериментальная кривая показана точками на рис. 2. Сила трения быстро убывает в интервале амплитуд колебаний от нуля до $0.1 \mu\text{m}$ и затем демонстрирует только незначительное убывание до амплитуд порядка $0.5 \mu\text{m}$.

3. Теория и сравнение с экспериментом. Для теоретической интерпретации результатов мы используем модель, описанную в [2]. Напомним кратко основные элементы модели. Рассматриваются два тела, связанные быстро осциллирующей связью длины (рис. 3).

$$l = l_0 + \Delta l \sin(\omega t), \quad (1)$$

движущиеся в случайном внешнем потенциале $U = U(x)$, определяемом спектральным разложением

$$U(x) = \int_0^{\infty} c(k) \cos(kx + \varphi_k) dk. \quad (2)$$

Помимо этого на пару действует постоянная внешняя сила F . Фазы φ_k считаются некоррелированными.

Для среднего квадрата „макроскопической“ силы (т.е. силы, усредненной по интервалу времени, существенно превышающему период

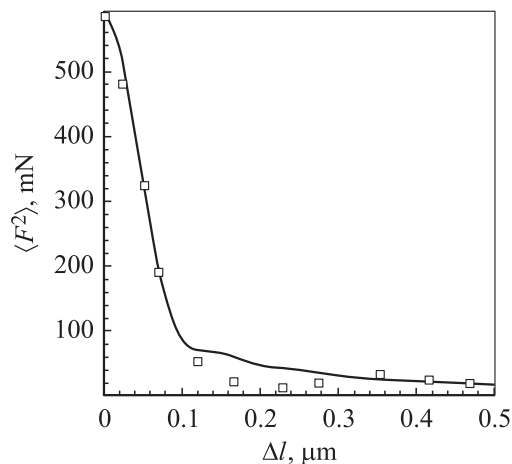


Рис. 2. Зависимость среднего квадрата силы от амплитуды колебаний; \square — экспериментальные значения, кривая — теоретическая зависимость (уравнения (3), (4) при $k_0 = 21 \mu\text{m}^{-1}$).

осциллирующий образца) имеет место соотношение (см. [2])

$$\langle \overline{F(x)^2} \rangle = 2\Phi \int_{k_1}^{k_2} c(k)^2 k^2 J_0^2 \left(\frac{k\Delta l}{2} \right) dk, \quad (3)$$

где $c(k)^2$ — спектральная плотность потенциала взаимодействия; $J_0(z)$ — функция Бесселя нулевого порядка; Φ — константа, определяющая средний квадрат силы, действующей в случайном потенциале на каждое из тел. В простейшем случае потенциала, содержащего только одну компоненту с волновым вектором k_0 , квадрат силы трения был бы пропорционален $J_0^2 \left(\frac{k_0 \Delta l}{2} \right)$; в этом случае сила трения обратилась бы в нуль при $\frac{k_0 \Delta l}{2} \approx 2.4$ и затем опять начала бы возрастать.

Предположим теперь, что потенциал взаимодействия содержит непрерывный спектр волновых векторов, однако в системе имеется некоторый характерный масштаб, дающий основной вклад в силу трения. Это означает, что спектральная плотность потенциала взаимодействия имеет максимум при определенном волновом векторе k_0 . В системе со случайными взаимодействиями ширина спектральной плотности в пространстве волновых векторов будет, вообще говоря,

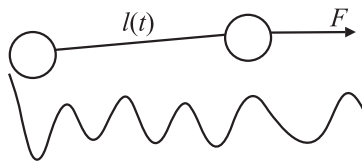


Рис. 3. Два тела, связанные осциллирующей связью, движущиеся в случайном потенциале.

того же порядка величины, что и сам характерный волновой вектор k_0 . В качестве модели такой спектральной плотности можно выбрать

$$c(k)^2 = \exp\left(-\frac{(k - k_0)^2}{2k_0^2}\right). \quad (4)$$

Среднее значение квадрата силы, вычисленное с этой спектральной плотностью с помощью уравнения (3) и нормированное на значение силы трения при амплитуде колебаний $l = 0$, приведено на рис. 2 (непрерывная линия). Наилучшее согласование между экспериментальными значениями и теоретической кривой достигается при $k_0 = 21 \mu\text{m}^{-1}$. Таким образом, основной вклад в силу трения дают взаимодействия на масштабе $L \sim 1/k_0 \approx 0.05 \mu\text{m} = 50 \text{ nm}$.

4. Выводы. В работе была исследована зависимость силы трения между стальной пластиной и быстро осциллирующим стальным образцом. Теоретическое предсказание состоит в том, что сила трения покоя существенно уменьшается при амплитудах колебаний порядка длины волны, дающих основной вклад в микроскопический потенциал взаимодействия, ответственный за формирование силы трения. На основе экспериментальных результатов мы приходим к выводу, что для пары сталь–сталь этот характерный масштаб составляет порядка 50 nm. Знание этого масштаба является основной предпосылкой для создания адекватных моделей трения и износа.

Список литературы

- [1] Tomlinson G.A. // Philos. Mag. 1929. V. 7. P. 905.
- [2] Popov V.L., Dudko O.K. // JTP Letters. 2004. V. 30. N 4. P. 42–48.
- [3] Dudko O.K., Popov V.L., Putzar G. // Tribologie und Schmierungstechnik. 2004. Heft 5. S. 23–26.
- [4] Dudko O.K., Popov V.L., Putzar G. // Int. J. of Tribology. 2004.