

05.1

©1994

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ ТРЕНИИ

В.Л. Попов

Экспериментальные исследования процессов, происходящих при трении, показывают, что вблизи поверхности трения возникает поверхностный слой толщиной в несколько десятков микрон, имеющий структуру, существенно отличающуюся от структуры массивного материала [1,2]. Существенно, что толщина этого слоя много больше характерного размера неоднородностей поверхности, поэтому для его теоретического описания должны быть применимы методы механики непрерывных сред.

Между тем в рамках чисто механической постановки проблемы нет никаких причин для формирования поверхностного слоя. Действительно, напряжения в стационарной задаче трения однородно распределены по всей толщине образца. Распределение температуры также не имеет никакого другого характерного пространственного масштаба, кроме толщины образца.

Ситуация, однако, существенно изменяется, если принять во внимание физическую природу взаимодействия поверхностных слоев при трении, состоящую во взаимодействии их микронеоднородностей. Если площадь фактического контакта микронеоднородностей много меньше площади поверхности, то это взаимодействие носит характер последовательности коротких "ударов" большей амплитуды, имеющих случайную длительность и интервал следования. Более того, если зависимость силы трения от скорости имеет падающий участок, то в системе возникнут автоколебания, частота которых будет определяться собственной частотой "резонатора" — трибосистемы в целом. При характерном размере трибосистемы порядка 1 см для частоты получаем оценку $\nu \approx 10^5$ Гц, что действительно является характерной частотой акустической эмиссии при трении [3] и при резании металлов [4].

В пользу описанного автоколебательного характера динамики трибосистемы говорит то, что изменение практически всех параметров трибосистемы, — таких, как состав, механическая добротность, скорость трущихся поверхностей, время работы, — влияет, главным образом, на интенсив-

ность акустического излучения, практически не изменяя его частотного состава [4].

Учитывая сказанное, можно попытаться описывать процессы, протекающие при трении, в рамках обычной механики материалов, не рассматривая в явном виде механику микронеоднородностей, а моделируя их влияние путем наложения нестационарных граничных условий. Такая постановка задачи имеет то преимущество, что она может (в неявном виде) включать в себя как влияние микронеоднородностей, так и нестационарность, возникающую в результате развития автоколебательного процесса. Компоненты внешних воздействий с ненулевыми частотами, как показано ниже, экспоненциально затухают в глубь материала в узком слое, определяя тем самым его свойства.

Рассмотрим два основных вида воздействия на поверхность материала.

Тепловое воздействие. Динамика температурного поля в материале определяется уравнением теплопроводности

$$\dot{T} = \alpha \Delta T, \quad (1)$$

где α — коэффициент теплопроводности. Дисперсионное уравнение этого уравнения имеет решение

$$K = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}(1 + i), \quad (2)$$

где ω — частота воздействия, K — комплексный волновой вектор. Величина, обратная мнимой части волнового вектора, определяет глубину проникновения возмущения в глубь материала

$$l = \sqrt{2\alpha/\omega}. \quad (3)$$

Подставляя частоту $\omega \approx 10^6 \text{ с}^{-1}$ [3,4] и характерное значение коэффициента теплопроводности для “грязных” металлов $\alpha \approx 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ [5] в формулу (3), найдем для толщины поверхностного слоя $l \approx 20 \text{ мкм}$, что хорошо согласуется с экспериментально наблюдаемыми величинами [1,2].

Механическое воздействие. Рассматриваемая модель предполагает, что в поверхностном слое при трении протекают те же процессы, что и при ударном воздействии. Как показано в динамической теории кристаллических сред с дислокациями, развитой в работах автора и Н.В.Чертовой [6-8], при ударном воздействии на кристаллическую среду в ней наряду с хорошо известными типами волн (упругий предвестник, волна объемного упругого сжатия) инициируются сильно диссипативные волны пластических деформаций и пластических поворотов, затухающие в тонком по-

верхностном слое. Это приводит к возникновению вблизи поверхности удара тонкого слоя с повышенной плотностью дислокаций. Экспериментальные наблюдения дают для толщины этого слоя оценки порядка 100 мкм [9]. В работе автора, посвященной динамике пластических поворотов в кристаллах [10], показано, что такого же порядка должен быть размер ротационных ячеек в кристаллах после прохождения ударных волн. Микроскопический смысл этой толщины, по-видимому, соответствует длине свободного пробега дислокаций в материале.

Таким образом, в результате каждого "микроудара" при трении в глубь материала начинают распространяться две волны: тепловая и механическая. Существенное значение имеет соотношение глубин проникновения этих волн. Так, если глубина проникновения "температурных вспышек" превышает длину свободного пробега дислокаций, то будет происходить эффективный отжиг поверхностного слоя с сохранением только низкоэнергетических дислокационных конфигураций, соответствующих малоугловым границам разориентации. В результате сформируется слой с высокой концентрацией дислокаций (сильно фрагментированный), но с низким уровнем собственных напряжений. Такое соотношение свойств наиболее благоприятно с точки зрения повышения износостойкости материала. В противоположном случае малой глубины проникновения температурных вспышек по сравнению с глубиной сильно деформированного слоя будет происходить формирование поверхностного слоя с высокими внутренними напряжениями, что способствует его растрескиванию и развитию абразивного износа.

Список литературы

- [1] Тарасов С.Ю., Колубаев А.В. // Изв. вузов. Физика. 1991. В. 8. С. 9-12.
- [2] Alpas A.T., Embury J.D. // Wear. 1991. V 16. N 2. P. 285-300.
- [3] Jiaa C.L., Dornfeld D.A. // Wear. 1990. N 2. P. 403-424.
- [4] Василенко Н.В., Летуновский В.В., Петровский Э.А. и др. // Матер. междунар. науч. практ. семинара "Триболог-10М". Рыбинск-Москва, 1993. С. 56-60.
- [5] Кузлинг Х. Справочник по физике. М.: Мир, 1985.
- [6] Popov V.L. // Int. J. Engng. Sci. 1992. V. 30. N 3. P. 329-334.
- [7] Popov V.L., Tshertova N.V. // Int. J. Engng. Sci. 1992. V. 30. N 3. P. 335-340.

- [8] *Попов В.Л., Чертова Н.В.* // Изв. вузов. Физика. 1992. В. 4. С. 81-93.
- [9] *Лыков С.В., Итин В.И., Месяц Г.А. и др.* // ДАН. 1990. Т. 310. В. 4. С. 858-861.
- [10] *Попов В.Л.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 14. С. 80-82.

Институт физики прочности и
материаловедения СО РАН
Томск

Поступило в Редакцию
3 октября 1993 г.