

05.1;11

Динамика разрушения поверхности при сухом трении

© Ю.А. Фадин

Институт проблем машиноведения РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 15 ноября 1996 г.

В окончательной редакции 13 марта 1997 г.

Предложен новый подход к описанию трения, основанный на динамическом взаимодействии поверхностных шероховатостей. Рассматриваются два типа взаимодействий, одно из которых вызывает только деформацию шероховатостей, а другое в конечном счете приводит к появлению частиц разрушения.

Реальные поверхности твердых тел имеют шероховатость. При сухом трении фактический контакт трущихся поверхностей оказывается дискретным. Его общая площадь мала, так, по данным [1], она составляет 0.1–0.01% от номинальной площади поверхности контакта. В зонах контакта шероховатостей (обычно называемых пятнами контакта) возникают большие механические напряжения. Сделаем оценку этих напряжений для единичного пятна контакта. Для этого заменим контакт шероховатостей на контакт Герца (контакт шара с упругим полупространством под действием статической силы P). Тогда, согласно Ханту [2], на глубине $h_{\max} = 0.49r$, где r — радиус пятна контакта, возникает максимальное касательное напряжение $\tau_{\max} = 0.465P/\pi r^2$. Диапазон изменения диаметров пятен контакта для металлов составляет 3–40 μm [3]. Максимальные касательные напряжения будут возникать на глубине от 1.5 до 20 μm . Для твердого тела при номинальных давлениях 2–4 МПа и с учетом того, что реальная площадь контакта не превышает 0.1% номинальной площади, τ_{\max} в окрестности единичного пятна достигают огромной величины 1–2 ГПа, причем без учета силы трения, которая еще больше увеличивает касательные напряжения. Таким образом, оценочные значения касательного напряжения вполне подходят для большинства металлов и достаточны для развития сдвиговых процессов в поверхностных слоях с последующим образованием трещин. Экспериментально наблюдается появление частиц разрушения уже в начальные моменты трения, что говорит об интенсивном образова-

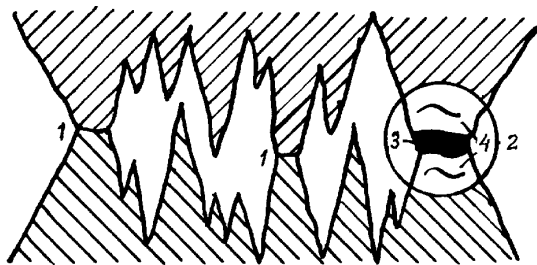


Рис. 1. Схема контакта шероховатых поверхностей: 1 — контакт шероховатостей, сопровождающийся их деформацией; 2 — зона контакта при сильном взаимодействии шероховатостей; 3 — область микросхватывания; 4 — приповерхностные трещины, возникающие при распаде контакта.

нии подповерхностных трещин [4]. Контакт единичных шероховатостей существует конечное время, которое определяется скоростью скольжения. Динамика пятен контакта создает флуктуирующее по глубине и во времени поле механических напряжений, в котором возникают и растут приповерхностные трещины. Поэтому трение твердых тел можно рассматривать как поверхностный динамический процесс одновременного возникновения и распада множества пятен контакта.

В настоящей работе основное внимание уделяется временному аспекту связи эволюции динамической системы, образованной пятнами контакта, и процесса поверхностного разрушения при трении.

Шероховатости имеют различную высоту, и поэтому при образовании пятен контакта могут по-разному взаимодействовать (рис. 1). Ограничимся рассмотрением динамической системы, состоящей всего из двух видов элементов. Один вид элементов составляют пятна контакта, которые при образовании сопровождаются упругим или пластическим деформированием шероховатостей. При распаде таких пятен контакта происходит только изменение формы составляющих их шероховатостей. Другой вид элементов динамической системы образуют пятна контакта, которые появились в результате сильного взаимодействия шероховатостей, когда между ними возникает область микросхватывания. Распад таких пятен контакта приводит в конечном счете к появлению частиц разрушения. Динамика поведения предложенной двухэлементной системы может быть описана в математическом виде. Для этого воспользуемся формализмом "хищник-жертва", который является одним из

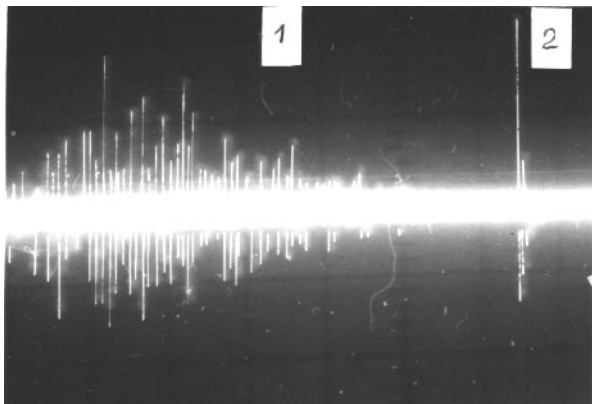


Рис. 2. Осциллограммы сигналов акустической эмиссии при сухом трении алюминия по сталь: 1 — ”длинный” сигнал, соответствующий появлению частицы разрушения поверхности; 2 — ”короткий” сигнал, соответствующий удару поверхностных шероховатостей.

простейших способов описания поведения нелинейных систем (модель Лотка–Вольтерра) [5]. Пусть n будет количеством пятен контакта, на которых происходят только явления деформации шероховатостей, а пятна контакта, которые образуют области микросхватывания с последующим образованием частиц разрушения, обозначим m ; в дальнейшем будем называть такие пятна контакта частицами разрушения. Изменения численности элементов системы во времени описываются нелинейными дифференциальными уравнениями

$$\frac{dn}{dt} = \alpha n - \gamma nm, \quad \frac{dm}{dt} = -\beta m + \delta nm, \quad (1)$$

где γ и δ — константы, характеризующие прирост, а γ и β — убыль элементов n и m соответственно. Решения этой системы нелинейных дифференциальных уравнений периодичны, смещены по фазе, имеют сложную форму и опубликованы в [5]. Для периода T выражение имеет вид

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\gamma\beta}} \quad (2)$$

и зависит только от констант α и β элементов системы. Можно сделать два вывода из периодичности решений уравнений (1).

1. Периодичность изменения количества частиц разрушения означает, что при сухом трении за время T от материала отделяется конечный объем материала и, следовательно, разрушение поверхности (изнашивание) происходит послойно и периодически.

2. Периодичность изменения количества пятен контакта означает, что в процессе трения шероховатость поверхности контакта воспроизводится от слоя к слою.

Константы α и β можно определить экспериментальным путем, например с помощью акустической эмиссии (АЭ). В настоящей работе было обнаружено, что все зарегистрированные при сухом трении металлов сигналы АЭ можно разделить на два вида, отличающиеся друг от друга на 1–2 порядка по длительности (рис. 2). При этом в интервалах времени, содержащих длинные сигналы АЭ, наблюдается появление частиц разрушения, а в интервалах времени, содержащих только короткие сигналы АЭ, частиц не наблюдается. Таким образом, короткие сигналы АЭ можно связать с деформационными явлениями при ударе шероховатостей, а длинные сигналы АЭ — с появлением частиц разрушения. Причем появление частиц разрушения связано с убылью пятен контакта типа m , т.е. с константой β . Значения скоростей генерации двух видов сигналов АЭ можно использовать в качестве констант в формуле (2). Так, для алюминия при давлении 3 МПа и скорости 0.6 м/с константа α составляет $\sim 5 \text{ s}^{-1}$, а $\beta \sim 0.01 \text{ s}^{-1}$, тогда $T \sim 28 \text{ s}$, что сравнимо со средним экспериментальным значением для периода разрушения слоя, полученным по зависимости коэффициента трения от времени $\sim 40 \text{ s}$ [6].

Список литературы

- [1] *Bowden F.P., Tabor D.* The friction and lubrications of solids. P. I. Clarendon Press. Oxford, 1950. 337 p.
- [2] *Hunt E.B.* // J. Appl. Phys. 1955. V. 26. N 7. P. 850–856.
- [3] *Демкин Н.Б.* Контактное трение шероховатых поверхностей. М.: Наука, 1970. 227 с.
- [4] *Фадин Ю.А., Лексовский А.М., Гинзбург Б.М., Булатов В.П.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 5. С. 10–13.
- [5] *Вольтерра В.* Математическая теория борьбы за существование. М.: Наука, 1976. 387 с.
- [6] *Булатов В.П., Полевая О.И., Седакова Е.Б., Фадин Ю.А.* // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 19. С. 1–5.