

ВРЕМЕННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ

© В.П.Булатов, О.В.Полевая, Е.Б.Седакова, Ю.А.Фадин

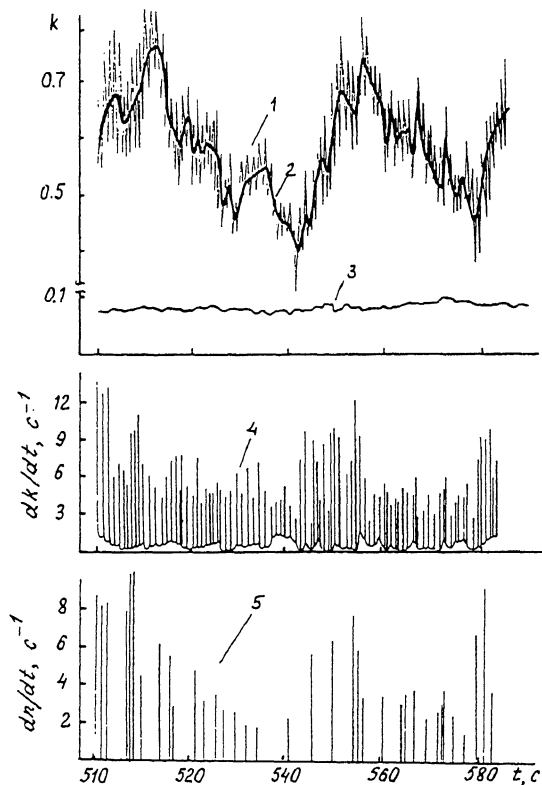
Коэффициент трения k является важнейшей характеристикой пары материалов. Он определяется как отношение силы трения F к нормальной относительно поверхности трения внешней силе N и записывается в форме, предложенной Амонтоном, как $k = F/N$. Существующие методы определения коэффициента трения сводятся к определению усилий. В инженерных расчетах принимается, что коэффициент трения является величиной постоянной, не зависящей от времени, как при трении со смазкой, так и без смазки, но, естественно, имеющей разные числовые значения в зависимости от типа материала пары [1]. В то же время известно, что экспериментальное определение k связано с большим разбросом численных значений, однако погрешности определения k приводятся редко [2]. Чтобы обойти экспериментальные трудности, разработаны многочисленные методы численного расчета k [3]. В последние годы усилился интерес к физической стороне явления трения, в связи с чем появились работы, рассматривающие физический смысл коэффициента трения [4-5]. В [4] коэффициент трения связывается с поверхностной прочностью и ему придается смысл интенсивности изнашивания. В [5] коэффициент трения рассматривается с термодинамических позиций. В [4] на основе экспериментальных наблюдений при трении без смазки

отмечается сильная нестабильность k во времени. С этим заключением можно согласиться лишь отчасти, т. к. при подробном рассмотрении коэффициента трения прослеживается его весьма сложная временная зависимость. На рисунке показаны временные зависимости коэффициента трения для пары алюминий–сталь, полученные при трении со смазкой (кривая 1) и без смазки (кривая 3). Трение проводилось по схеме диск (сталь)–палец (алюминий). Коэффициент трения определялся по току потребления электродвигателя машины трения. На рисунке отчетливо видно, что в случае со смазкой еще можно говорить о постоянстве во времени коэффициента трения (с некоторой погрешностью), но при сухом трении ни о каком постоянстве k не может быть и речи. Таким образом, представляется, что для изучения физической природы трения необходимо провести исследование кинетики изменения коэффициента трения и его тонкой структуры. Это и является целью настоящей работы.

В энергетическом смысле трение представляет собой процесс трансформации поступающей в систему механической энергии в другие виды энергии. Работа сил трения A при малых скоростях скольжения ($v < 10$ м/с) сосредоточена в основном в тонких поверхностных слоях контактирующих материалов. Она описывается простой формулой $A = kNvt$, где t — время, и при постоянных значениях N и v только коэффициент трения k определяет поступление энергии в трибосистему.

Экспериментально изменение и перераспределение энергетических потоков на поверхностях трущихся тел можно наблюдать только в процессе самого трения, для чего необходимо развивать и применять *in situ* методы исследования. По сути дела, непрерывная во времени регистрация коэффициента трения представляет собой вариант *in situ* метода. Анализ временной зависимости $k(t)$ при сухом трении пары твердый металл–мягкий металл методами числового сглаживания и дифференцирования [6] показывает, что, по крайней мере в простейшем случае, запись коэффициента трения можно представить в виде наложения двух процессов. Один из них представлен низкочастотной составляющей (кривая 2), а другой, более высокочастотный, многочисленными острыми пиками.

Низкочастотная составляющая коэффициента трения, выделенная операцией числового сглаживания, имеет явно циклический характер. Циклический характер изменения физических свойств материалов поверхностей трения был обнаружен ранее [7]. При исследовании разрушения поверхностей трения в опытах с применением таких *in situ* методов



Фрагмент временной зависимости коэффициента трения для пары алюминий–сталь. Давление на контакте 3 МПа, линейная скорость скольжения 0.6 м/с. 1 — временная зависимость коэффициента сухого трения, 2 — низкочастотная составляющая коэффициента сухого трения, 3 — коэффициент трения со смазкой, 4 — производная коэффициента сухого трения, 5 — активность акустической эмиссии при сухом трении.

регистрации, как акустическая эмиссия (АЭ) [8], непрерывный морфологический анализ частиц разрушения [9] и измерение температуры [10], также была обнаружена цикличность. Во всех этих экспериментах фактически изучались отдельные потоки энергии, которая выделялась или поглощалась в трибосистеме. Изучение же временной зависимости коэффициента трения позволяет говорить о динамической картине общего баланса подводимой и выделяющейся в трибосистеме энергии. Работа сил трения затрачивается на упругое и пластическое деформирование поверхностных слоев и на прямой нагрев трущихся материалов. Другие

виды трансформации механической энергии при малых скоростях скольжения несущественны (например, излучение). Работа трения (подводимая энергия) зависит от площади фактического контакта и от свойств поверхностных слоев, которые (например, упрочнение и разупрочнение [5]) меняются в процессе трения сравнительно медленно. Поэтому та часть коэффициента трения, которая описывается низкочастотной составляющей, может быть связана с поступающей в трибосистему механической энергией и ее перераспределением (например, в тепло). Природа высокочастотной составляющей, по-видимому, связана с дискретностью контакта.

Известно, что трение происходит за счет механического зацепления микровыступов контактирующих поверхностей по так называемым пятнам контакта [11], которые имеют размер $\sim 10\text{--}20$ мкм. Время взаимодействия микровыступов очень мало. Можно предположить, что высокочастотные пики коэффициента трения соответствуют каким-либо быстропротекающим энергетическим процессам в контактирующих поверхностных слоях, например, разрушению мостиков схватывания на пятнах контакта, ударам микровыступов, образованию подповерхностных микротрещин, фазовым превращениям.

Представляет большой интерес идентификация доминирующих процессов или хотя бы видов энергии выделения. Это можно сделать с помощью дифференцирования зависимости $k(t)$. Дифференцирование зависимости $k(t)$ приводит к подчеркиванию высокочастотных пиков. Результаты дифференцирования показаны на рисунке (кривая 4). Для упрощения рисунка изображены только абсолютные значения низкочастотной составляющей и положительные выбросы производной от высокочастотных пиков. Полученная зависимость имеет циклический характер и описывает скорость выделения энергии в трибосистеме при сухом трении. Эти результаты интересно сравнить с данными, полученными методом акустической эмиссии, который основан именно на регистрации упругозапасаемой части энергии деформации. На рисунке (диаграмма 5) показана активность акустической эмиссии dn/dt , полученная синхронно с изменениями коэффициента трения. Видно, что активность АЭ качественно неплохо коррелирует с высокочастотными изменениями коэффициента трения dk/dt . Таким образом, общая выделяющаяся на контакте энергия может быть связана с упругой частью энергии деформации поверхностных слоев, а скорость выделения упругозапасаемой энергии оказывается пропорциональной активности акустической эмиссии dn/dt . Установленные закономерности позволяют сделать

вывод о том, что коэффициент трения имеет энергетический смысл и может характеризовать энергетические процессы в контактирующих поверхностных слоях.

Список литературы

- [1] Крагельский И.В., Виноградова И.Э. Коэффициенты трения. М.: Машгиз, 1962. 220 с.
- [2] Крагельский И.В., Митин Н.М. // Заводская лаборатория. 1968. Т. 34. В. 8. С. 1007-1009.
- [3] Барабаш М.Л., Мусийко В.Д. Проблемы трения и изнашивания. 1973. В. 4. С. 34-40.
- [4] Сорокин Г.М. // Заводская лаборатория. 1995. Т. 61. В. 6. С. 52-56.
- [5] Федоров С.В. // Заводская лаборатория. 1995. Т. 61. В. 1. С. 41-49, 65.
- [6] Ланцош К. Практические методы прикладного анализа. М.: Физматгиз, 1961. 524 с.
- [7] Марченко Е.А., Непомнящий Е.Ф., Харач Г.М. // ДАН СССР. 1968. Т. 181. В. 5. С. 1103-1104.
- [8] Фадин Ю.А., Леховский А.М., Гинзбург Б.М., Булатов В.П. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 5. С. 10-13.
- [9] Фадин Ю.А., Полевая О.В., Попов И.Н. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 22. С. 62-65.
- [10] Фадин Ю.А., Седакова Е.Б., Булатов В.П. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 2. С. 35-39.
- [11] Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.

Поступило в Редакцию
4 июля 1996 г.