

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ТЕПЛА И ФОРМИРОВАНИЯ СИЛЫ ТРЕНИЯ

Национальный авиационный университет

Рассмотрена модель трибологическом контакта в виде ансамбля межатомных связей. Показано, что мгновенная сумма сил ансамбля компенсирует внешнюю нагрузку; на этапе образования связей поверхностная энергия превращается в тепло; ансамбль связей, находящихся на этапе разрыва, формирует силу трения.

Введение. Как и во всей традиционной науке при исследовании процессов в трибологии преобладает механический подход; расчеты основываются на геометрических представлениях, использовании методов линейной теории упругости, моделей деформации и разрушения сплошной среды [1]. Трение рассматривается как результат преодоления сопротивления разрушению образующихся в контакте микроскопических мостиков холодной сварки, а также сопротивления деформации поверхностных слоев внедрившимися выступами контртела. При таком подходе большое значение придается установлению связи сил трения с упругостью, прочностью, твердостью твердых тел, шероховатостью поверхностей.

Опыт практической трибологии, в частности эксплуатации узлов трения авиационной техники, показывает, что такие представления не соответствуют реальным процессам в контакте антифрикционных систем. Любые формы деформации, разрушения и даже изменение внешнего вида поверхности трения рассматриваются как признаки аномального процесса отказа [2]. За пределами механических представлений находится также процесс образования тепла, в котором участвуют поверхностные атомы двух твердых тел, а силы связей между ними формируют силу трения. Настоящая работа посвящена исследованию атомного механизма этих процессов.

Результаты. Внешняя нагрузка воспринимается упругими силами связей между поверхностными атомами контактирующих твердых тел. Мгновенная суммарная сила этих связей в направле-

нии, нормальном к площади контакта, равна нагрузке. При относительном движении твердых тел в контакте происходит непрерывный процесс разрыва существующих и возникновения новых связей, мгновенная суммарная сила этих связей в направлении движения равна силе трения. Фундаментальный акт трения заключается в образовании и разрыве связей между атомами контактирующих твердых тел, при этом возникают элементарные порции тепла и силы трения. Это событие совершается на пространстве порядка $2 \cdot 10^{-10}$ м и временном интервале 10^{-10} с. За время существования связь совершает $\sim 10^3$ флуктуаций, вызванных тепловыми колебаниями атомов.

При относительном движении поверхностей на тепловые флуктуации связей накладываются изменения состояний, вызванные непрерывным изменением средних межатомных расстояний и, соответственно, мгновенных сил в связях. Для оценки силы трения нужно определить количество связей в контакте, оценить мгновенную силу в каждой связи в направлении движения и просуммировать эти силы. Траектории и мгновенные состояния отдельных атомов, а также связей между ними, ненаблюдаемы и неизмеримы. Трибологические системы открыты, они обмениваются с окружающим пространством энергией, веществом и информацией. Процессы в таких системах необратимы, неравновесны и нелинейны, поэтому естественно применение при исследовании трения методов и понятий теории ансамблей и необратимых систем [3].

Больцман считал, что при исследовании систем, состоящих из большого количества элементов, следует наблюдать не за отдельным элементом, а за эволюцией всего ансамбля; при этом нельзя обойтись без применения понятий и методов теории вероятностей [4]. Использование теории ансамблей приводит к отказу от понятия индивидуальной траектории; теория ансамблей исследует эволюцию функций распределения и плотности вероятности, которые описывают состояние ансамбля в целом.

Рассмотрим ансамбль связей между поверхностными атомами контактирующих поверхностей. Мгновенная сила $F(r)$ межатомной связи является функцией расстояния между атомами r . Это расстояние непрерывно изменяется вследствие тепловых колебаний атомов, а также относительного движения поверхностей. Воспользовавшись

свойством эргодичности временных вероятностей, силу трения можно представить как мгновенную суммарную силу ансамбля связей в направлении движения в следующем виде:

$$F_{\text{тр}} = \frac{N}{2} \int_{z_1}^{z_2} F(r) \rho(r) dr, \quad (1)$$

где N – количество связей на 1 см^2 площади трения; r – межатомное расстояние; $F(r)$ – сила связи в состоянии r ; $\rho(r)$ – плотность вероятности состояния r ; r_1 и r_2 – межатомные расстояния соответственно в моменты образования и разрыва связи.

Для того чтобы воспользоваться выражением (1), нужно определить количество связей в трибологическом контакте, а также две функции: зависимости силы в связи от межатомного расстояния $F(r)$ и плотности вероятности $\rho(r)$ состояний от r .

Количество связей в трибологическом контакте можно оценить исходя из следующих соображений. Упругие силы всех $\sim 10^{15}$ связей на 1 см^2 по любому сечению твердого тела оценивает модуль объемной упругости. Внешнюю нагрузку в трибологическом контакте воспринимают упругие силы связей, которые возникают между поверхностными атомами твердых тел. Среднюю концентрацию связей в контакте можно оценить отношением нормальной нагрузки P к модулю объемной упругости D . Мгновенная суммарная сила этих связей в нормальном к контакту направлении равна нагрузке, а в направлении движения – силе трения. Формулу (1) можно представить в виде

$$F_{\text{тр}} = \left(\frac{NP}{2D} \right) \int_{z_1}^{z_2} F(r) \rho(r) dr, \quad (2)$$

где N – количество атомов на 1 см^2 поверхности трения; P – нагрузка, Па; D – объемный модуль упругости твердых тел, Па.

Выражение перед интегралом определяет концентрацию связей в контакте, а интеграл – среднюю силу в одной связи. Для обычных материалов и реальных нагрузок в узлах трения эта величина находится в диапазоне 10^{-6} – 10^{-3} от количества атомов на поверхности трибологического контакта. То есть, одновременно действуют 10^8 – 10^{12} связей на 1 см^2 и эти связи разделены десятками и сотнями межатомных расстояний; поэтому относительно сил, действующих в плоскости контакта, их можно считать независимыми. С точностью до отношения твердости к модулю упругости (3–5%) эти

связи однородны относительно действующих в них сил.

Для определения функций $F(r)$ и $\rho(r)$ нужно исследовать динамические состояния атомов в твердом теле. В соответствии с законом равнораспределения в равновесном состоянии энергия тепловых колебаний в твердом теле одинакова во всех направлениях трехмерного пространства [5]. Каждый атом можно рассматривать как изотропный гармонический осциллятор, состояния которого равномерно распределены на сфере, а в качестве модели связи использовать линейный гармонический осциллятор.

Если в качестве меры использовать время t , то функция распределения случайной величины $F(r)$ задает вероятность того, что ее мгновенное значение в момент времени t не превысит некоторого значения ξ :

$$P [F(r) < \xi] = \lim \{t [F(r) < \xi]/T\},$$

где T – общее время процесса; $t[F(r) < \xi]$ – время, в течение которого связь находится на расстоянии $F(r)$ не дальше ξ .

Характер изменения функции распределения вероятности от нуля до единицы в значительной степени определяет макроскопические свойства ансамбля. Вероятностную структуру случайного процесса задают градиентом функции распределения, равного производной:

$$\rho(r) = d P[F(r)]/dr.$$

Эта величина называется плотностью вероятности.

Плотности вероятностей, построенные по мере времени, обладают полезным для практики свойством эргодичности, которое состоит в том, что вероятность состояния $\Delta[F(r)]$ одной межатомной связи равна относительному количеству из большого ансамбля однородных связей, находящихся в этом состоянии. Для оценки среднего значения функции можно использовать дискретный аналог интеграла (1) в виде

$$F(r) = \sum_i t_i F(r_i)/T,$$

где t_i – время нахождения системы в состоянии r_i ; $F(r_i)$ – значение функции $F(r)$ в состоянии r_i ; T – общее время процесса.

Отношение t_i/T рассматривается как вероятность нахождения в данный момент связи в i -м состоянии.

В одномерной двухатомной модели термин «связь» используется в том смысле, что энергия системы двух атомов будет возрастать как при увеличении, так и при уменьшении расстояния между атомами r по сравнению с расстоянием r_0 . [6]. Полную энергию

металлической связи в зависимости от межатомного расстояния r можно представить известной функцией в виде

$$U(r) = -A e^2 r^{-1} + Br^{-2} + Ce^2 r^{-3}.$$

Первый член определяет кулоновские силы притяжения, связанные с потенциальной энергией свободных электронов, второй и третий – силы отталкивания, вызванные кинетической энергией свободных и связанных электронов, e – заряд электрона, A , B и C – константы.

Минимум энергии системы соответствует линейному размеру r_0 , который можно рассматривать как параметр кристалла. Равновесные состояния межатомных металлических связей в гармоническом приближении дают нулевое значение интеграла в формуле (1), что указывает на отсутствие макроскопических сил по любому сечению твердого тела во всех направлениях. Под воздействием внешнего силового поля флуктуации связей перестают быть гармоническими, происходит перераспределение вероятностей между притягивающими и отталкивающими состояниями. Если внешняя нагрузка сжимающая, то увеличивается вероятность отталкивающих состояний, в случае растягивающей нагрузки – вероятность притягивающих состояний. Это означает, что внешнее силовое поле вызывает в твердом теле появление избыточных связей, компенсирующих влияние этого поля. При увеличении нагрузки растет вероятность перехода атомов через потенциальный барьер и постепенно упругое состояние твердого тела переходит в стационарное пластическое состояние. При переходе атома через барьер уменьшается несущая сила связи, соответственно увеличивается нагрузка на другие связи. В стационарном состоянии каждая связь, переходящая барьер, вызывает появление новой такой же связи, и атомы переходят в новые равновесные состояния. При дальнейшем увеличении нагрузки ансамбль связей достигает точки бифуркации. После прохождения этой точки каждая связь, перешедшая барьер, вызывает образование двух и большее количество таких же связей. Возникает автокаталитический процесс, который приводит к образованию в разных местах объема твердого тела скоплений критических связей, переходящих в зародыши разрушения в виде микроскопических участков с разделенными поверхностями. Нагрузка на оставшиеся связи увеличивается, количество и размер участков с разделенными поверхностями также растет. При нагрузке, равной пределу прочности, происходит лавинообразный рост количества,

размера таких участков и объединение их в поверхность разрушения. Образование поверхности разрушения начинается на многих благоприятно ориентированных участках, что подтверждается сложной фрактографией поверхностей разрушения. Процесс разрушения происходит не мгновенно, а последовательно, это объясняет различие теоретической и реальной прочности твердых тел.

Состояния связей в упругой сплошной среде, какой является твердое тело, взаимозависимы, т.е. изменение состояния одной связи влияет на состояния всех других связей. В трибологическом контакте состояния связей коррелированы в нормальном направлении и независимы на поверхности контакта. Это существенным образом влияет на распределение вероятностей и макроскопические силы, которые являются суммой большого количества парных взаимодействий.

Каждую связь можно рассматривать как деформируемую частицу, состояние которой зависит от расположения и динамики ближайших атомов, а также влияния внешних силовых полей. В такой частице операция анализа позволяет разделить плотность вероятности состояний во времени и пространстве на три вида относительно действующих в ней сил: силы, нормальные к поверхности контакта; силы, действующие на этапе образования межатомных связей; силы, действующие на этапе разрыва связей. Следующая затем операция синтеза позволяет объединить состояния связей в три ансамбля и качественно исследовать свойства каждого ансамбля.

Количество связей в первом ансамбле определяет выражение перед интегралом уравнении (2) $\dot{N} = NP/D$; нормальная нагрузка P компенсируется суммой упругих сил N флуктуирующих связей. Механизм возникновения этих сил, как и внутри твердого тела, определяется перераспределением вероятности состояний в связях между атомами контактирующих поверхностей в пользу отталкивающих состояний.

В плоскости контакта эти связи разделены десятками межатомных расстояний, т.е. трибологический контакт не является сплошной средой. При относительном движении поверхностей в любой момент времени на площади контакта приблизительно половина ($N/2$) связей находятся в состоянии образования, а другая половина – в состоянии разрыва. На этапе образования связи избыточная поверхностная энергия двух атомов самопроизвольно превращается в кинетическую энергию тепловых колебаний. Спонтан-

ный этап образования связи контролирует энтропия, поэтому возбуждаемые состояния с равной вероятностью распределены в трехмерном пространстве. Это означает, что суммарная макроскопическая сила ансамбля $N/2$ связей, находящихся на этапе образования, в любом направлении площади контакта равна нулю.

После того как в процессе относительного движения поверхностей средние значения флуктуации атомов прошли состояние r_0 , наступает этап разрыва связи. Атомы вновь становятся поверхностными и приобретают избыточную поверхностную энергию, при этом совершается работа в направлении движения против сил кулоновского притяжения. Мгновенная суммарная сила ансамбля $N/2$ связей, находящихся на этапе разрыва, формирует макроскопическую силу трения. Отталкивающие состояния в связях трибологического контакта действуют только нормально, а по всем направлениям поверхности контакта такие состояния не возникают, так как отсутствуют ближайшие соседние атомы. Величину $N/2$ – количество связей на единице площади трибологического контакта, находящихся на этапе разрыва, можно определить как площадь фактического контакта, мгновенная сила разрушения которой в направлении движения равна силе трения. Для оценки этой величины можно принять расчетную прочность по Я. Френкелю, который использовал статическую модель кристалла, учитывал только кулоновские силы притяжения и игнорировал отталкивающие состояния в связях [5]. Он оценил прочность металла с параметрами кристаллической решетки, близкими к железу, величиной $\sigma_p = 10^5$ МПа. Реальная прочность углеродистых сталей находится в диапазоне $\sigma_b = (4-10) 10^2$ МПа, т.е. в пределах одного процента от расчетной прочности. Выше было показано, что такое различие можно объяснить автокаталитическим механизмом разрушения.

Разделив (2) на нагрузку P , получим формулу для коэффициента трения μ , в числителе которой предел прочности σ_p , а в знаменателе – модуль упругости D .

$$\mu = \sigma_p / 2D \quad (3)$$

Если принять в качестве предела прочности оценку по Френкелю, объемный модуль упругости стали $D = 1,7 \cdot 10^5$ МПа, то получаем значение коэффициента трения $\mu \approx 0,3$. Длительное время, начиная от Леонардо да Винчи, коэффициент трения считался одинаковым для всех твердых тел и равным 0,25–0,3. Эксперименталь-

ное значение коэффициента трения, полученное при испытании стали 45 по стали 45 при комнатной температуре в вакууме $\mu = 0,5$, а при трении в среде жидкого азота – $196\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\mu = 0,7$ [6]. Различие между расчетным и реальными значениями коэффициента трения связано со свойствами самообразующихся трибологических структур диссипативного типа. Элементами структуры являются молекулы, кластеры, ультрадисперсные частицы; трение возбуждает в них вращательные степени свободы, что приводит к увеличению количества задействованных в процессе связей и соответственно силы трения.

Заключение. Исследована модель трибологического контакта в виде ансамбля между поверхностными атомами твердых тел. В этой модели атом одной поверхности связан только с одним атомом контртела, количество связей пропорционально отношению внешней нагрузки к модулю упругости; при изменении внешней нагрузки соответственно увеличивается или уменьшается количество связей в контакте. При относительном движении поверхностей происходит разрыв одних и возникновение новых связей. За время существования каждая связь вносит элементарный вклад в макроскопическую силу, компенсирующую внешнюю нагрузку, в процесс образования тепла, а также в макроскопическую силу трения. Эргодичность функций распределения позволила использовать вероятности состояний одной связи при оценке макроскопических характеристик ансамбля.

Если при оценке коэффициента трения в уравнении (3) использовать не расчетные, а реальные значения предела прочности, то получим значение на два порядка меньшее приведенного выше. Это означает, что для многократного уменьшения коэффициента трения нужно возбудить в связях отталкивающие состояния в направлении движения. Для этого следует без увеличения общего количества связей объединить их в компактные участки, в пределах которых, как и внутри твердого тела, действуют отталкивающие состояния.

Эффективным способом уменьшения сил трения может быть снижение уровня поверхностной энергии и, соответственно, сил трения. Этот метод подтвержден экспериментально, а именно: поверхностную энергию уменьшали путем облучения поверхности нейтронами, при этом сила трения уменьшалась на два порядка; после прекращения облучения сила трения восстанавливалась до первоначального значения.

Список литературы

1. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В.Крагельский, М.Н.Добычин, В.С.Комбалов – М.: – Машиностроение, 1977. – 626 с.
2. Кеба И.В. Диагностика авиационных газотурбинных двигателей. /Кеба И.В.– М.: Транспорт. – 1968. –248 с..
3. Пригожин И. От существующего к возникающему /Пригожин И.// – М.: Наука, 1984. – 234 с.
4. Борн М. Атомная физика / Борн М. – М.: Мир. 1970. – 451 с.
5. Френкель Я.И. Введение в теорию металлов / Френкель Я.И. – М.: Наука, Физматгиз. – 1958 – 368 с.
7. Кульгавый Э.А. Трение и износ при низких температурах. Автореф.... дисс. канд. техн. наук: 05.02.04 Трение и износ в машинах. –К.: КИИГА, 1974. –24 с.

УДК 621.891

Кульгавый Е. А. Механізм утворення тепла та формування сили тертя // Проблеми тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2009. – Вип. 52. – С.19–27.

Розглянуто модель трибологічного контакту у вигляді ансамблю міжатомних зв'язків. Показано що миттєва сума сил ансамблю компенсує зовнішнє навантаження; на етапі утворення зв'язків поверхнева енергія перетворюється в тепло; ансамбль зв'язків, що перебувають на етапі розриву, формує силу тертя

Список лит.: 7 найм.

Kulgaviy E.A. Mechanism of the forming the heat and shaping of power of friction

The relationships between atomic in tribological contact join in the three ensembles: instant amount of power of the first ensemble compensates the external load; in conditions, in step of forming the relationships, surface energy changes in heat; the ensemble of the relationships, residing in step of breakup, forms power of friction.

Стаття надійшла до редакції 19.10.09.