

САМООРГАНИЗАЦИЯ ТРИБОСИСТЕМ ПРИ ГРАНИЧНОМ ТРЕНИИ МЕТАЛЛОВ

А.В. Баранов, В.А. Вагнер, С.В. Тарасевич, О.В. Быкова

Используя принципы термодинамики неравновесных процессов в открытых системах доказано, что пара трения удовлетворяет принципам самоорганизации. При трении образуются новые упорядоченные структуры с регулируемым уровнем энтропии. Этот эффект может быть использован для регулирования фрикционных характеристик контакта.

Using principles of thermodynamics of nonequilibrium processes in open systems it is proved, that the friction pair satisfies to self-organising principles. At a friction the new ordered structures with adjustable level of entropy are formed. This effect can be used for regulation of frictional characteristics of contact.

Существует традиционное мнение, что трение является разрушительным процессом, направленным на необратимое диспергирование поверхностного слоя материала трущихся тел. При этом, с точки зрения термодинамики Клаузиуса должен наблюдаться рост энтропии, т.е. рост необратимого беспорядка в замкнутой системе которой, по мнению многих, является изнашиваемая пара трения. А является ли она таковой?

Если считать, что пара трения обменивается веществом и энергией с окружающей средой, то есть являться термодинамически открытой системой, то и представления об этом объекте могут быть иными.

Сейчас установлено, что в открытых системах неживой природы, которые постоянно получают из внешней среды отрицательную энтропию и вещество, могут возникать стационарные неравновесные состояния с высокой степенью упорядоченности со снижением энтропии системы подобные повышению степени организованности биологических систем в соответствии с эволюционной теорией Дарвина [1].

Известно также, что в открытых системах неживой природы, которые постоянно получают из внешней среды отрицательную энтропию и вещество, также могут возникать стационарные неравновесные состояния с высокой степенью упорядоченности [2].

Тонкопленочные объекты зоны трения подвержены сложным процессам разрушения – восстановления, не согласующиеся с традиционными принципами термодинамики равновесных систем. Это происходит на фоне мощнейших удельных концентраций энергии на микроконтактах, приводящих материал

в состояние «Магма-плазма» [3] с особыми свойствами вещества.

Самоорганизация не является универсальным свойством материи и существует лишь при определенных внутренних и внешних условиях.

В соответствии с термодинамикой неравновесных процессов новые упорядоченные структуры могут возникать в природе при выполнении четырех необходимых условий впервые сформулированных И.Р. Пригожиным [2]:

1) система является термодинамически открытой, т.е. может обмениваться со средой веществом и энергией;

2) динамические уравнения системы нелинейны;

3) отклонения от равновесия превышают критические значения;

4) микроскопические процессы происходят кооперировано (согласованно).

Во многих случаях явления неживой природы отсутствуют признаки самоорганизации, наблюдается рост энтропии. Такие процессы как растворение кристаллов солей, взаимная диффузия соприкасающихся веществ и т.д. сопровождаются потерей степени упорядоченности. Таких примеров множество.

Есть и другие примеры снижения энтропии системы. Рост кристаллов из насыщенных растворов, ледяные узоры на окнах, регулярные волны на поверхности водоемов и речном дне, образование атмосферных вихрей и т.д. Это примеры самоорганизации неживой природы, но уже в открытых системах.

С одной стороны, при стремлении энтропии к максимуму, в обычных закрытых системах вообще, и, как, казалось бы, в раз-

рушаемых трибосистемах в частности, в парах трения напротив, иногда, возникают состояния авторегулирования энтропии. Это происходит с сочетаниями комплекса процессов симметрии флуктуаций и восстановления, в соответствии с принципом наименьшего действия [4]. Также наблюдаются и другие известные и неизвестные нам процессы квазиуправления.

Эффект пленки, особенно тонких трибопленочных структур, изучен достаточно слабо, но в условиях трения очень наглядно проявляются такие ее свойства – как эффект саморегулирования энтропии (толщины, состава и свойств анизотропии), обуславливающий динамическое равновесие в системе при соблюдении принципа наименьшего действия [4]. При этом определяющую роль имеют авторегулируемые обратные связи.

Примером биологической самоорганизации фрикционных пар могут являться сочленения подвижных частей тела живых организмов, не изнашиваемые, точнее регенерируемые, в процессе существования.

Узлы трения в неживой природе во многих случаях также удовлетворяют требованиям самоорганизации. Они представляют открытую систему. К ним подводится энергия. Узел трения обменивается веществом с окружающей средой (активные компоненты среды и смазочного материала, удаление продуктов изнашивания). Это создает условия для самоорганизации при неравновесных процессах массообмена с окружающей средой.

Исследуем процесс внешнего трения, который может протекать при различных условиях смазки. Будем исходить из концепции механохимического механизма трения и изнашивания. Основные принципы данного механизма следующие [3].

При фрикционном взаимодействии твердых тел и пластической деформации тонкого поверхностного слоя возникает резкое увеличение физико-химической активности последнего. Наличие активных компонентов среды (кислорода, присадок к смазочному материалу и т.д.) приводит к пассивации поверхностного слоя с образованием тонкопленочных объектов (третьего тела, вторичных структур). С одной стороны образовавшаяся пленка препятствует адгезионному взаимодействию трущихся тел, создает положительный градиент сдвигового сопротивления (условие внешнего трения), уменьшая при этом трение и изнашивание. С другой стороны, достигнув определенной толщины, при

данном уровне механических воздействий, сама является объектом разрушения. Процессы образования и разрушения данных новых структур находятся в динамическом равновесии, что позволяет трактовать данное явление как гетерогенную трибохимическую реакцию, происходящую на разделе фаз в несколько стадий: подвод реагирующих компонентов к месту реакции (диффузия, конвекция), собственно химическая реакция (образование пленки), удаление продуктов реакции (износ). Общая скорость данного процесса может лимитироваться скоростью любой из перечисленных стадий.

Обратим внимание на некоторые явления, которые позволяют выявить процессы самоорганизации. Известно, что при относительном движении трущихся тел при постоянных прочих условиях шероховатость трущихся поверхностей независимо то исходного уровня стремится к постоянному оптимальному значению в процессе работы. Оптимизируется не только микротопография фрикционных поверхностей, но и параметры образующихся поверхностных слоев с особой анизотропной структурой и механическими свойствами. Толщина слоев оптимальна для данных условий работы пар трения в соответствии с принципом наименьшего действия. Существование оптимума толщины пленки при трении доказано многими исследователями и может быть проиллюстрировано рисунком 1 [5].

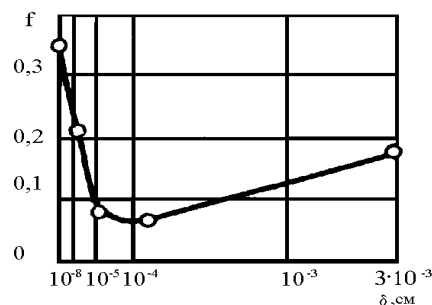


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента трения от толщины тонкой пленки индия (нанесенной на инструментальную сталь)

По мнению авторов [5] – Бюудена и Тейбора - при трении стального ползуна по пленке индия разной толщины оказывается, что имеется оптимальная толщина с точки зрения энергетических потерь. Как трактуют сами авторы, нагрузка передается через такую пленку и предохраняет трущиеся поверхности от непосредственного контакта. Срез происходит в мягком металле. При уменьше-

нии толщины пленки до 0,1 мкм сила трения убывает, а затем начинает возрастать. При толщине 0,01 мкм, как указывают авторы, пленка перестает быть эффективной. При механохимическом изнашивании оптимум толщины пленки достигается благодаря наличию двух противоположных нелинейных процессов. При толщине пленки меньше оптимального значения наблюдается ее ускоренный рост благодаря высокой активности подложки и малому сопротивлению диффузии. При большой толщине пленка механически и физически экранирует доставку активных компонентов к месту реакции. Кроме того, толстые пленки являются механически нестабильными вследствие комплекса несоответствий (температурных коэффициентов, периодов кристаллических решеток и т.д.) с основным материалом. При механическом воздействии они разрушаются. К эффектам устойчивой самоорганизации можно отнести обнаруженный нами факт регулярных колебаний внешних трибологических параметров (сил трения, переходного электросопротивления, параметров акустической эмиссии) при условиях трения, близких к заеданию. Период колебаний составлял от 5 до 10 мин в зависимости от режима трения. Данное явление можно объяснить с позиций одновременно протекающих встречающихся процессов.

При жестких режимах трения скорость доставки активных компонентов среды оказывается недостаточной для полной пассивации поверхностей. При этом наблюдаются явления микросхватываний с увеличением шероховатости поверхностей трения. Переходное сопротивление при этом резко падает, увеличивается амплитуда отдельных импульсов акустического излучения, падает его частота [6]. Интегральный коэффициент трения слегка растет. Рост шероховатости вызывает увеличение контактного зазора и, как следствие – повышение расхода активных веществ из внешней среды. Благодаря достаточному количеству реагентов процесс внешнего трения возобновляется. Далее возникает процесс приработки с уменьшением шероховатости. При этом начинает падать объем доставки пассиватора. Процесс повторяется.

Принцип оптимальности поверхностных структур для данных условий трения можно продемонстрировать следующим экспериментом.

При установившемся режиме однонаправленного торцевого трения пары сталь 45 + сталь 45 + Литол 24 ($P = 1$ МПа), быстро изменяли скорость скольжения в направлении, указанном стрелками на рисунке 2.

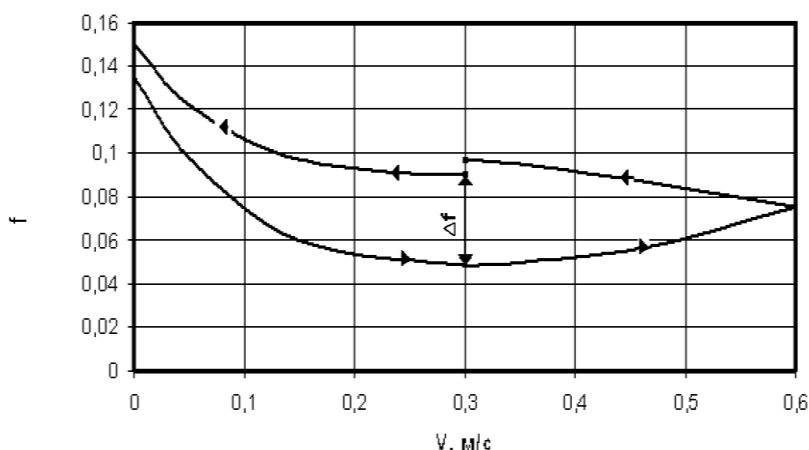


Рисунок 2 – Изменение коэффициента трения в функции скорости скольжения ($t = 44$ с)

Однако при нулевой скорости скольжения делали паузу t от 2 до 100 с. При этом фиксировали коэффициент трения f . Во всех экспериментах при различных установившихся режимах в обратной нижней ветви графика наблюдается минимум коэффициента трения точно соответствующий первоначальной приработочной скорости скольжения. Таким образом, сформированные граничные слои

оптимальным образом соответствуют данному режиму трения. Наличие гистерезиса Δf говорит о наличии противоположных процессов, протекание одного из которых (изнашивание) мы исключили, останавливая процесс трения. Следует отметить некоторое различие характера конечной стадии циклов испытаний для различных стационарных скоростей скольжения. При этом качественное

различие кривых при различной длительности циклов для одной и той же первоначальной скорости скольжения не наблюдалось. Характер изменения количественных значе-

ний гистерезиса и минимального коэффициента трения в функции длительности паузы при остановке машины трения приведен на рисунке 3.

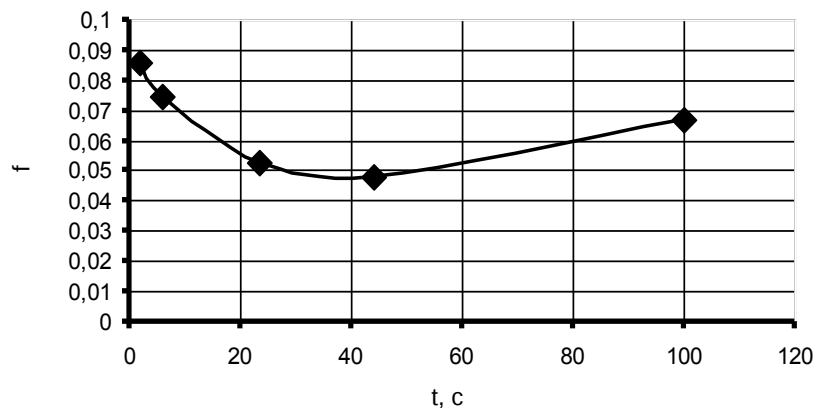


Рисунок 3 – Изменение минимального коэффициента трения в функции времени остановки машины трения

Причины наличия гистерезиса, возможно, связаны с проявлением принципа Ле Шателье, состоящего в том, что в системе, находящейся в равновесии, при изменении одного из факторов, управляющим этим равновесием, возникают компенсирующие процессы, стремящиеся ослабить влияние этого изменения. Однако, в данном случае, трибохимические процессы не являются равновесными. На наш взгляд данный эффект заключается в следующем.

Остановка машины трения приводит к исключению процесса дезорганизации (диспергирования) граничного слоя (обратный процесс), а процессы, направленные на самоорганизацию (формирование вторичных структур, прямой процесс) еще некоторое время продолжают действовать, что приводит к еще большему упорядочению фрикционного контакта и, как следствие - уменьшение силы трения. При увеличении времени выдержки цикла в большей мере проявляется прямой процесс и тем сильнее проявляется процесс снижения энтропии и сил трения. Однако прямой процесс, хотя и наделен некоторой инертностью, он также порождается энергетическими механизмами затрат на трение (активацией поверхности) и при высокой длительности паузы соответственно начинает замедляться. При этом величина гистерезиса после некоторого максимума начинает уменьшаться, а минимальный коэффициент трения расти.

Таким образом, приведенные данные показывают, что особенностью процесса гра-

ничного трения является тенденция к упорядочению, вызываемая потоком организованной механической энергии. Эта тенденция проявляется в образовании различных высокоорганизованных структур снижающих трение и износ. Внешнее управление встречными потоками в парах трения (например, регулированием доставки в зону трения компонентов внешней среды и т.д.) открывает возможность управления фрикционными характеристиками с целью снижения трения и изнашивания и создания трибосопряжений с заданными свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаркунов, Д. Н. Триботехника / Д.Н. Гаркунов. – М., 1989. – 327 с.
2. Карери, Дж. Порядок и беспорядок в структуре материи / Дж. Карери.: Пер. с итал. - М., 1985.
3. Баранов, А. В. Метод прогнозирования и способы повышения ресурса изнашивающих подвижных сопряжений деталей машин / А.В. Баранов.: Дис. на соиск. ученой степени канд. техн. наук. – Л., 1988.
4. Поляков, А. А. Теоретический анализ основных механизмов эволюции трибосистем при избирательном переносе // Долговечность трущихся деталей машин. – М., 1988. – №3.
5. Боуден, Ф. Р. Трение и смазка / Ф.Р. Боуден, Д.М. Тейбор: Пер. с англ. – М., 1960.
6. Лебедев, В. М. Акустические исследования работы трибосопряжений, смазываемых пластичными смазочными материалами / В.М. Лебедев, А.В. Баранов // Долговечность трущихся деталей машин. – М., 1988. – №3.