УДК 621. 891

Э. А. КУЛЬГАВЫЙ

Национальный авиационный университет, Украина

ЭЛЕМЕНТЫ НЕРАВНОВЕСНОЙ ТРИБОЛОГИИ

Исследованы самоорганизации, бифуркации, иерархия внутренних пространственно-временных масштабов в контакте антифрикционных систем; показано, что основную роль играют процессы синтеза на атомно-молекулярном и нано уровнях, и установлено определяющее влияние на процессы самообразующихся трибологических структур.

Ключевые слова: *трибологическая система, самоорганизация, трибологическая структура, стационарное состояние, отказ.*

Введение. С появлением человека начался новый антропогенный период в истории земли. Техногенный характер человеческой деятельности во многом нарушает естественный ход природных процессов, существенно влияет на состояние биосферы: водную оболочку, нижнюю часть атмосферы и верхнюю часть твердой оболочки Земли – литосферы; является одной из главных причин изменения климата и многих природных катастроф [1]. При традиционном затратном механистическом подходе процесс улучшения качества жизни предполагает прогрессивное увеличение энергетических, трудовых и материальных затрат. Приближение условий жизни всего населения к уровню развитых стран, при таком подходе, может привести к необратимому ухудшению состояния биосферы. Для того, чтобы улучшение уровня жизни происходило без необратимых отрицательных явлений в природе и конфликтов в обществе, нужно многократное снижение расхода всех видов ресурсов на условную единицу качества жизни. В представлении Вернадского должен наступить новый этап развития биосферы, когда под влиянием научной мысли, коллективного труда, направленного на удовлетворение потребностей человека, возникнет новое состояние, которое он назвал «ноосферой». В решении этой задачи к ключевым следует отнести проблемы трибологии, которая изучает процессы, происходящие в контакте между твердыми телами, находящимися под нагрузкой при относительном движении этих тел [2]. К объектам исследования трибологии относятся: биологические системы – суставы, зубы; технические – антифрикционные, фрикционные и технологические системы; бытовые – обувь, одежда и др. Трибологические системы в значительной степени определяют здоровье людей, долговечность, надежность, безопасность, экономичность техники и бытовых вещей. Поэтому исследование объектов и решение проблем трибологии должно быть отнесено к приоритетным направлениям развития науки и техники.

Содержание. Антифрикционные системы применяются в узлах трения всех видов техники и в значительной степени определяют их ресурс, надежность и безопасность. Обеспечение современного уровня надежности и безопасности авиационной техники требует таких затрат на техническое обслуживание и ремонт, которые часто превышают первоначальную стоимость изделий. Для уменьшения этих расходов нужно, чтобы ресурс узлов и агрегатов соответствовал ресурсу конструкции самолета. Этого можно достичь путем создания трибологических систем, характеристики которых должны быть на порядок выше, чем у существующих.

Ресурс конструкции современных самолетов достигает 70–100 тыс. часов, ресурс двигателей, редукторов, агрегатов маслосистем, топливных и гидросистем

ограничен износом деталей подвижных соединений и обычно не превышает 10 тыс. часов. Время испытаний при определении характеристик износа таких деталей измеряется в сотнях, а характеристик отказа – в тысячах часов. При разработке качественно новых систем традиционными методами время одного испытания будет соответственно увеличиваться на порядок, это определяет бесперспективность эмпирического подхода. Нужен переход от экстенсивных к интенсивным методам исследования, основанным на знании фундаментального механизма процессов образования тепла, формирования силы трения, потоков вещества и отказов в трибологическом контакте.

В традиционной трибологии преобладает механистический подход, при этом сила трения рассматривается как результат преодоления сопротивления деформации поверхностных слоев твердых тел выступающими неровностями контртела, а также, сопротивления разрушению микроучастков холодной сварки. Износ представляется как результат микрорезания, когезионного отрыва, усталостного разрушения поверхностных слоев твердых тел или хрупкого разрушения химических пленок [3]. При таком подходе основное внимание уделяется зависимостям триботехнических характеристик от механических свойств контактирующих тел: твердости, прочности, предела усталости и др.

Многолетний опыт практической трибологии, в частности, эксплуатации и ремонта антифрикционных систем в авиации показал, что такие представления не соответствуют реальному состоянию трибологического контакта. Несмотря на то, что вследствие экономии размеров и массы, узлы трения в авиации работают при максимально допустимых нагрузках, любая форма разрушения поверхности рассматривается как признаки аномального состояния отказа. Часто интенсивность износа более твердых деталей намного выше мягкой сопряженной детали. Продукты износа представляют собой смесь агрегатов молекул, наноразмерных частиц окислов, сульфидов, фосфатов, коксов, смол, металлполимеров, металлорганических солей, комплексов и др. [4]. Частицы таких размеров не могут быть получены путем механического разрушения, а только синтезом из вещества твердых тел и смазки.

Трибологические системы неравновесны, процессы в них необратимы, для таких систем характерны: самоорганизация, существование иерархии внутренних пространственно – временных масштабов, устойчивых стационарных состояний и непредсказуемых бифуркаций, нелинейность взаимодействий и [5].

Два контактирующих твердых тела и смазка – твердая, жидкая, газообразная или их смесь образуют трибологическую систему. Под воздействием трибологической среды в системе возникают процессы трения, износа и отказа. Характеристики этих процессов являются результатом суперпозиции внутренних свойств трибосистемы, как единого объекта, а также состояния трибологической среды, включающей три элемента: двухмерное пространство скоростей и нагрузок, трехмерное пространство в виде конструкции, информационное пространства.
Внешняя нагрузка воспринимается упругими силами связей между поверхностными атомами контактирующих твердых тел. Мгновенная суммарная сила этих связей в направлении, 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 связи между атомами контактирующих твердых тел, при этом возникают элементарные порции тепла и

силы трения. Это событие совершается на пространстве порядка 210 м и временном, интервале 10^{-10} с. За время существования связь совершает ~10^3 флуктуаций, вызванных тепловыми колебаниями атомов. Пространство и время существования связи можно считать минимальным элементом в пространственно-временной иерархии трибологических событий.

Траектории и мгновенные состояния отдельных атомов, а также, связей между ними, ненаблюдаемы и неизмеримы; поэтому, естественно применение при исследовании трения методов и понятий теории ансамблей и необратимых систем. 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. Теория ансамблей исследует эволюцию функций распределения и плотности вероятности, которые описывают состояние ансамбля в целом.

Среднюю концентрацию связей в контакте можно оценить отношением нормальной нагрузки P [Па] к модулю упругости D [Па], она находится в диапазоне 10^{-6} – 10^{-3} от общего количества атомов на поверхности трения 10^{15}.на см^2. Мгновенная суммарная отталкивающая сила этих связей в нормальном к контакту направлении равна нагрузке, а притягивающая сила в направлении движения - силе трения. Методы теории неравновесных систем позволяют сделать оценку коэффициента трения. Для этого условно разделим связи на три ансамбля относительно действующих сил. Концентрация отталкивающих связей определяется отношением P [Па] к D [Па], суммарная сила ансамбля равна внешней нагрузке. При трении половина связей находится на этапе сближения, при этом поверхностный потенциал самопроизвольно превращается в кинетическую энергию тепловых колебаний. Вероятности таких колебаний и межатомные силы равномерно распределены в трехмерном пространстве, то есть, суммарная сила по ансамблю равна нулю в любом направлении. Третий ансамбль составляет вторая половина связей, которые находятся на этапе разрыва, при этом совершается работа против сил электрического притяжения и восстанавливается поверхностный потенциал. Концентрация связей в ансамбле равна относительной площади фактического контакта, связи разделены и независимы. Поэтому, при оценке суммарной силы разрыва связей ансамбля, равной силе трения, можно использовать теоретическую прочность по Френкелю σ_m [6]. Тогда сила трения будет иметь вид $F_{тр} = \sigma_m\ P/2D$, а коэффициент трения $\mu = \sigma_m /2D$.

Если принять в качестве теоретической прочности железа оценку по Френкелю $\sigma_m = 10^5$ МПа, объемный модуль упругости стали $D = 1{,}7\times10^5$ МПа, то получаем значение коэффициента трения $\mu \approx 0{,}3$. Такое значение коэффициента трения долгое время считалось одинаковым для всех твердых тел, тогда его определяли по наклону плоскости скольжения. Облучение поверхностей трения нейтронами привело к уменьшению поверхностного потенциала и снижению коэффициента трения на два порядка, после окончания облучения коэффициент трения восстанавливался.

Обмен связей в процессе трения сопровождается непрерывным переносом атомов между контактирующими поверхностями, взаимодействием этих атомов с продуктами механодеструкции молекул смазки. Минеральные масла в различных соотношениях содержат углеводороды парафинового, нафтенового, ароматического рядов, а также, их кислородные, сернистые, азотистые производные. В незначительных количествах масла содержат: асфальтены, смолы, органические кислоты и др. Молекулы таких соединений имеют сложную цепную структуру, в процессе трения происходит их деструкция с образованием радикалов, гидро-

ксильных и полярных групп. Молекулы взаимодействуют активными частями с аналогичными молекулами, поверхностными и переносимыми атомами металлов, образуя новые молекулы, агрегаты-мицеллы, наноразмерные частицы. Поверхностный атом может переноситься на контртело, присоединять молекулы смазки или отрываться от поверхности и растворяться в смазке.

Превращение поверхностного потенциала в тепло при образовании связи и восстановление его при разрыве связи – позволяет считать контакт флуктуирующим случайным образом потенциальным полем. Использование модели перемежаемости Зельдовича для таких полей, приводит к возникновению в случайных местах в случайное время пиков вероятности потенциала [7]. Эти пики могут возникать на отдельных участках, иметь форму сеток, ячеек и др., при этом, самым слабым пикам потенциала соответствуют резкие пики концентрации переносимого вещества. Таким образом, в неравновесных условиях контакта формируются трибологические структуры – динамическое состояние вещества, существующее только непосредственно в процессе трения. Об их существовании свидетельствуют наноразмерные аморфизированные слои вторичных структур, на поверхностях трения.

Трибологические структуры формируются на эволюционном этапе приработки и затем функционируют в стационарном режиме по нелинейным законам синергетики, их верхний уровень ограничен энтропийным фактором, а нижний – свободной энергией. Время возобновления трибоструктур и путь трения за это время является второй характеристикой в иерархии внутренних пространственно – временных масштабов трибологических событий. Это очень важная характеристика, она измеряется в десятках часов и определяет продолжительность испытаний при оценке характеристик износа[8].

У каждой антифрикционной системы на двухмерном пространстве скоростей и нагрузок существует область устойчивых стационарных состояний. Каждая точка этой области является аттрактором, многократно изменяя скорости и нагрузки и, затем, возвращаясь в первоначальную точку, мы всегда получим исходный уровень триботехнических характеристик. Развитие отказа всегда связано с разрушением трибоструктуры, постепенный отказ происходит в результате износа в области стационарных состояний. Происходит частичное и обратимое разрушение трибоструктуры, при этом, некоторая часть ее вещества уходит из контакта в виде продуктов износа, затем трибоструктура возобновляется. Износ на каждом интервале возобновления является независимой величиной, а сумма достаточно большого количества таких величин, определяет состояние отказа, распределена по нормальному закону и поэтому предсказуема.

Внезапный отказ – это случайное событие, заключающееся в скачкообразном изменении параметра системы. В области стационарных состояний он с одинаковой вероятностью может возникнуть в любой момент и, поэтому, непредсказуем. Состояние внезапного отказа можно рассматривать как бифуркацию в неравновесной системе, после возникновения такого состояния система может либо непредсказуемо вернутся в стационарное состояние, либо будет развиваться процесс отказа, который заканчивается аномально высоким значением износа, заклиниванием, поломкой конструкции или пожаром.

При исследовании механизма внезапного отказа используем основной результат теории неравновесных процессов, который заключается в том, что устойчивости стационарных состояний угрожают только автокаталитические реакции, в которых продукт реакции участвует в воспроизводстве самого себя. Повыше-

ние вероятности отказа при нагрузках, соответствующих границе области стационарных состояний, связано с нарушением устойчивого динамического равновесия между свободной энергией и энтропией в трибоструктуре. Рост энтропии приводит к увеличению подвижности элементов диссипативной структуры и снижению ее несущей способности. Происходит увеличение размера и количества участков твердых тел, непосредственно контактирующих с контртелом. Это активизирует процесс когезионного отделения микроскопических частиц от поверхности, рост их количества и размера. При достижении критических размеров частицы создают перенапряжение в контакте и вызывают отделение подобных частиц. Процесс развивается по автокаталитическому механизму, приводит к необратимому разрушению трибологической структуры и отказу. Реальные узлы трения работают в стационарном состоянии, процессы отказа в них зарождаются при случайном отделении частиц от поверхности, или попадании из окружающей среды, что может привести к возбуждению автокаталитической реакции и, соответственно, процесса отказа. Развитие отказа всегда связано с разрушением трибоструктуры, при износе это разрушение частичное и обратимое, а в случае внезапного отказа – полное и необратимое. Для обеспечения оптимального соотношения энтропии и свободной энергии в трибологической структуре при низкой температуре осуществляют прогрев от внешних источников или путем работы на режимах малого газа. При высоких температурах систему охлаждают, существуют разнообразные методы охлаждения.

В стационарном состоянии внезапный отказ достаточно редкое событие, еще более редкое событие – авария или катастрофа из-за отказа техники. Вероятность не должна превышать соответственно 10^{-6} и 10^{-7} на час полета для воздушного судна в целом [9]. Время налета на одну аварию 10^6 часов или катастрофу 10^7, и соответствующий путь трения можно считать максимальным интервалом в пространственно-временной иерархии. Для оценки вероятности таких событий используется информационное пространство, включающее сведения об отказах и неисправностях по всем типам самолетов за все время существования авиации. Определены признаки, которые позволяют обнаруживать состояние отказа на ранней стадии и избегать опасных последствий

Заключение. Создание атифрикционных систем нового поколения невозможно без знания внутренней структуры и особенностей неравновесных состояний в трибологическом контакте. Прежде всего, это относится к процессу самоорганизации, заключающегося в том, что в результате многоэтапного синтеза из синтезированных при трении молекул и наноразмерных частиц формируются трибологические структуры диссипативного типа. Затем они функционируют в стационарном режиме по нелинейным законам синергетики и контролируют уровень трибологических процессов. В том случае, когда в процессе участвует вещество твердых тел – происходит износ, а когда только вещество смазки, то на поверхности трения может образоваться покрытие; явление бифуркации проявляется во внезапном возникновении автокаталитического процесса, необратимом разрушении трибоструктуры, возникновении состояния отказа.

При трении поверхностная энергия превращается в тепло, а на ее восстановление, при разрыве межатомных связей, затрачивается работа трения. Связи между поверхностными атомами твердых тел разделены в среднем десятками межатомных расстояний, поэтому возникают отталкивающие силы в плоскости контакта, Возбуждение этих сил в трибологических структурах, наряду с уменьше-

нием поверхностной энергии контактирующих тел, являются перспективным направлением в решении проблемы уменьшения сил трения.

В формировании силы трения участвует огромное количество межатомных связей, поэтому необходимо использование методов теории ансамблей и теории вероятностей.

Исследование процессов формирования и функционирования трибоструктур – важнейший элемент в комплексе работ по созданию новых трибосистем.

При этом, необходимо использование современного оборудования и методов нанотехнологии, а также, разработка математических моделей для описания динамики неравновесных состояний в закрытом трибологическом контакте.

Список литературы

1. Вернадский В.И. Труды по всеобщей истории науки / В.И Вернадский. – Москва: Наука, 1988. – 335с.

2. Кульгавый Э.А. Трибология и проблемы экологии /Э.А Кульгавый // Проблемы трибологии. – 2005. – Вып.№2. – С.113-122.

3. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н.Добычин, В.С.Комбалов. – М.: – Машиностроение, 1977. – 626с

4. Кеба И.В. Диагностика авиационных газотурбинных двигателей / И.В.Кеба. – М.: Транспорт, 1968. – с.248

5. Пригожин И. От существующего к возникающему / И. Пригожин. – М.: Наука, 1985. – с.328

6. Френкель Я.И. Введение в теорию металлов / Я.И. Френкель. – М: Наука, 1958- с.368.

7. Зельдович Я.Б. Перемежаемость в случайных средах/ Я.Б Зельдович // УФН. – 1987. – Вып.1. – С.33–41

8. Кульгавый Э.А. Триботехнические характеристики и их применение / Э.А Кульгавый // Проблемы трибологии.– 2003. – №3. – С.51–61

9. Нормы летной годности гражданских самолетов СССР. – МАП, МГА. – 1974. – с. 344.

Стаття надійшла до редакції 27.05.2013

Е. А. КУЛЬГАВИЙ

ЕЛЕМЕНТИ НЕРІВНОВАЖНОЇ ТРИБОЛОГІЇ

Досліджено самоорганізації, біфуркації, ієрархія внутрішніх просторово-часових масштабів в контакті антифрикційних систем; показано, що основну роль відіграють процеси синтезу на атомно-молекулярному та нано рівнях та встановлено визначальний вплив на процеси трибологічних структур, які самоутворюються.

Ключові слова: трибологічні система, самоорганізація, трибологічна структура, стаціонарний стан, відмова.

E. A. KULGAVIY

ELEMENTS OF NON-EQUILIBRIUM TRIBOLOGY

Investigated self-organization, bifurcation, internal hierarchy of spatial and temporal scales in contact with anti-friction systems shows that the main role played by the processes of synthesis at the atomic and molecular and nano levels, and established a decisive influence on the processes of self-generated tribological structures.

Keywords: tribological system, self-organization, tribological structure, steady state, the refusal.

Кульгавый Эдуард Арсентиевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры машиноведения Национального авиационного университета, 5.015@i.ua.