

*Э. А. Кульгавый, канд. техн. наук, старш. науч. сотруд.*

## **ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ В АНТИФРИКЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

Национальный авиационный университет, LSD-Tuning@ukr.

*Установлено, что трибологические структуры образуются в процессе многоэтапного синтеза, показана определяющая роль поверхностных состояний твердых тел, явлений переноса и самоорганизации в неравновесных условиях трибологического контакта.*

В традиционной трибологии при исследовании процессов, происходящих в контакте, преобладает механистический подход. При этом, износ рассматривается как результат микрорезания: когезионного, усталостного или хрупкого разрушения поверхностных слоев твердых тел [1]. Опыт эксплуатации узлов трения в авиации показал, что любая форма разрушения поверхности – недопустима и определяется как признак аномального состояния отказа [2]. Продукты износа деталей авиационных агрегатов и двигателей состоят из наноразмерных (не более 100 нм.) частиц, конечного результата физико-химического взаимодействия материала твердых тел и смазки. Частицы таких размеров не могут быть получены путем механического измельчения, а только методами синтеза. То есть, в контакте антифрикционных систем происходит многоэтапный синтез молекул, кластеров, мицелл, наноразмерных частиц. На этом синтез не заканчивается, в неравновесных условиях трибологического контакта возникают процессы самоорганизации. Обладающие большим избытком свободной энергии активные частицы объединяются и образуют трибологические структуры диссипативного типа [3]. Этот термин определяет динамическое состояние вещества, которое существует в трибологическом контакте только в процессе трения. В зависимости от индивидуальных внутренних свойств трибологических структур при трении может происходить износ, возникать безыносное состояние, либо на поверхностях трения формироваться покрытие. В настоящей работе приведены результаты исследования механизма этих процессов.

Трибологические системы далеки от равновесия, процессы в них необратимы, в таких системах отсутствуют управляющие потенциалы типа энтропии или свободной энергии, действующие в равновесных системах. Это означает, что каждая система индивидуальна и ее нужно исследовать отдельно [4]. Частицы, формирующие структуру, могут быть когерентны на отдельных участках, образовывать ячейки, сетки, сплошные волнообразные или клинообразные слои. После прекращения трения на поверхностях остаются слои вторичных структур, которые являются обычно объектом исследования. Трибологические структуры формируются на эволюционном этапе приработки, а также, в процессе прогрева при каждом запуске двигателя, при этом система переходит в устойчивое стационарное состояние. Существуют разные типы стационарных состояний. Если вещество твердых тел участвует в формировании и функционировании трибоструктуры, часть вещества выносятся в окружающее пространство, таким образом, формируется износ. В том случае, когда твердые тела играют роль катализатора, а сами не участвуют в формировании потоков вещества, может возникнуть безыносное состояние, трибоструктура функционирует за счет вещества подводимого со смазкой [5]. При определенных условиях из трибологической структуры на поверхности трения может формироваться покрытие. Для активизации этого процесса разработаны специальные присадки к маслам, например, «ревитализанты». Это металлсодержащие вещества, многокомпонентные смеси минералов с добавлением катализаторов, которые способствуют превращению трибоструктур в металлокерамические, металлоорганические и другие виды покрытий [6].

Внешнюю нагрузку в трибологическом контакте воспринимают упругие силы связей между поверхностными атомами твердых тел. При относительном движении поверхностей происходит обмен связей, при этом образуется тепло, формируются сила трения и потоки вещества [7]. В этих процессах существенную роль играют поверхностные состояния (ПС) атомов твердых тел. Они существенно отличаются от состояний внутренних атомов кристалла. Шошли трактовал ПС как ненасыщенные химические связи атомов, находящиеся на поверхности [8] Их концентрация в по порядку величины должна равняться концентрации поверхностных атомов, при этом, свободные валентные связи могут насыщаться,

соединяясь с посторонними атомами. Наличие таких атомов приводит к расщеплению существующих и появлению новых ПС.

В гранецентрированной (ГЦК) решетке каждый атом окружен двенадцатью ближайшими соседями, таким образом, координационное число равно 12. Если энергия связи с одним соседом равна  $U$ , то поверхностный слой состоит из набора атомов с энергией связи от 1 до  $11U$ , и только небольшая часть атомов будет иметь энергию  $12U$ , достаточную для испарения. Наибольшей вероятностью покинуть поверхность твердого тела обладают атомы, имеющие связь с решеткой равной  $1U$ , меньшую вероятность имеют атомы с энергией связи  $2U_1, 3U_1, 4U_1 \dots 11U_1$ . Атомы, имеющие энергию  $12U$ , уже не являются поверхностными.

Каждый поверхностный атом имеет одно ПС, однако, в зависимости от количества внутренних связей эти ПС имеют разную склонность к расщеплению. Если поверхностный атом в ГЦК решетке имеет связь с 3 внутренними атомами, то его ПС может расщепиться на 2, 3 ... 9 состояний, то есть, он может соединиться с таким же количеством поверхностных атомов контртела. Если количество таких связей больше 3, то атом переносится на поверхность контртела. Таким образом, в процессе трения происходит непрерывный перенос атомов между контактирующими поверхностями. Наибольшая концентрация переносимых атомов и межатомных связей возникает на выступающих участках поверхностей трения. При достижении критического количества и плотности связей на таких участках контакта возникает кристаллическая структура. Это часто приводит к когезионному отрыву частиц от поверхности и развитию аномального состояния отказа. Во избежание этого, в антифрикционных системах используется трение со смазкой.

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, гидроксильных и полярных групп. Молекулы взаимодействуют активными частями с аналогичными молекулами, поверхностными и переносимыми атомами металлов, образуя новые молекулы, кластеры, агрегаты-мицеллы.

Поверхностный атом может переноситься на контртело, присоединять молекулы смазки или отрываться от поверхности и растворяться в смазке.

В процессе трения происходит окисление и образуются: кислоты, альдегиды, нафтеновые окиси, асфальтовые окиси, ангидриды, закиси кислот, ароматические асфальтены, продукты полимеризации[9]. В результате многоступенчатого синтеза образуются конечные продукты физико-химических превращений: окислы, сульфиды, фосфаты, коксы, металлоорганические соли, комплексы и др. в виде молекул, кластеров, мицелл и наноразмерных частиц.

В неравновесных условиях трибологического контакта, в потоках энергии и вещества из этих активных частиц формируются трибологические структуры, свойства которых определяют уровень трибологических процессов. Превращение поверхностного потенциала в тепло при образовании связи и восстановление его при разрыве связи, позволяет считать контакт флуктуирующим случайным потенциальным полем. Согласно теории перемежаемости Зельдовича для таких полей характерно возникновение в случайных местах в случайное время пиков потенциала [9]. 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 трибологического контакта формируются структуры по поверхности соответствующие форме пиков потенциала. Такие структуры функционируют только непосредственно в процессе трения. Об их существовании свидетельствуют вторичные структуры, тончайшие слои на поверхностях трения, это: аморфизированные слои чистых металлов, структуры Бэ́льби, Гаркунова, матовые слои на поверхностях цилиндров поршневых двигателей и др. Формирование трибоструктур достаточно тонкий индивидуальный процесс, зависящий от множества внутренних и внешних факторов. Методом Оже спектроскопии установлено, что при трении бронзы Бр.АЖМц 10-3-1,5 в смазке АМГ-10 по стали ШХ-15на поверхности бронзы образуется вторичная структура толщиной 70–100 нм, содержащая до 90 % углерода. Углерод присоединяется к поверхностным атомам металла при механодеструкции углеродсодержащих молекул смазки. Если в этой системе заменить сталь на детонационную системы TiC – Co, то происходит избирательное

растворение легирующих элементов из бронзы. В результате взаимопереноса на поверхности бронзы образуется слой аморфизированной меди толщиной 400–700 нм.

Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что процесс формирования трибологических структур сложным образом зависит от состава твердых тел, применение нового материала привело к изменению качественной картины процесса.

Трибологические структуры формируются на эволюционном этапе и затем функционируют в стационарном режиме по нелинейным законам синергетики, их чрезмерный рост ограничен энтропией, а минимальный уровень – свободной энергией. Уровень стационарного состояния в диссипативных системах определяет конкуренция свободной энергии  $F$  и энтропии  $S$ . Свободная энергия системы определяется уравнением  $F = E - TS$ , при низких температурах формируются устойчивые структуры, соответствующие минимуму свободной энергии типа кристалла, при высокой температуре структуры, соответствующие максимуму энтропии – жидкие или газообразные. В далеких от равновесия трибологических структурах диссипативного типа, устойчивы стационарные состояния, уровень которых определяет конкуренция энергии и энтропии. Температура является параметром, распределяющим влияние между энтропией и энергией. Температуру в трибологической структуре определяет скорость и нагрузка. Для каждой трибологической системы существует область устойчивых стационарных состояний – аттракторов. При изменении скорости и нагрузки процесс следует за траекторией этого движения, при возвращении в начальную точку характеристики трения и износа восстанавливают начальный уровень.

В том случае, когда скорость и нагрузка выходят за пределы области стационарных состояний, трибоструктура теряет несущую способность и разрушается вследствие высокой подвижности ее элементов. Для расширения области рабочих нагрузок разрабатываются различные системы охлаждения. Интенсивный отвод тепла уменьшает влияние энтропийной составляющей в трибологической структуре и расширяет область стационарных состояний.

При низкой температуре преобладает консолидирующее влияние свободной энергии. Вследствие малой подвижности элементов трибоструктуры это приводит к ее разрушению и развитию состояния отказа: схватыванию, заклиниванию, задиру. Во избежа-

ние этого, осуществляют прогрев системы от внешних источников, либо путем работы на режимах малого газа.

### Список литературы

1. Крагельский И. Основы расчета на трение и износ / И. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
2. Кеба И. Диагностика авиационных газотурбинных двигателей / И. Кеба. – М.: Транспорт. – 1968. – С.248.
3. Кульгавый Э.А. Триботехнические характеристики и их применение // Проблемы трибологии.– 2003. – №3. – С.51–61
4. Пригожин И. От существующего к возникающему / И. Пригожин. – М: Наука, – 1985. – 328 с.
5. Гаркунов Д. Триботехника / Д Гаркунов. – М: Машиностроение, 1985. – 424 с.
6. Войтов В.А. Технологии триботехнического восстановления, обзор и анализ перспектив // Проблемы трибологии. – 2005. – № 2. – С.86 – 94.
7. Кульгавый Э.А. Трибосистемы в случайных средах // Проблемы трибологии. – 2004. – №3. – С.9–12.
8. Shokley W. On the Surface States Associated with a Periodic Potential // Phys. Rev. – 1939. – N1. P. 319—326
9. Зельдович Я.Б. Переменяемость в случайных средах УФН // Т.152. – 1987. – Вып.1.– С.33–41.

*Кульгавий Е. А. Трибологічні структури в антифрикційних системах* // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2012. – Вип. 58. – С. 26–31.

Встановлено, що трибологічні структури утворюються в процесі багатоетапного синтезу, показано визначальну роль поверхневих станів твердих тіл, явищ переносу та самоорганізації в не рівноважних умовах трибологічного контакту.

Список літ.: 9 найм.

*Kulgaviy E. A. Tribological structure in anti-friction systems*

Found that tribological structures formed during multistage synthesis, shows the decisive role of surface states of solids, transport phenomena and self-organization in non-equilibrium conditions of tribological contact.

**Ключевые слова:** трибосистема, трибоструктура, самоорганизация.

Стаття надійшла до редакції 19.10.2012