

УДК 621.891

## НАУЧНАЯ ПАРАДИГМА ДОСТИЖЕНИЯ АНОМАЛЬНО НИЗКОГО ТРЕНИЯ В ТРИБОЛОГИИ

**Трошин О.Н., к.т.н.**

*(Харьковский национальный университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба)*

*В статье представлена научная парадигма достижения аномально низкого трения и износа в трибологии с позиции современных физических теорий, а также результаты теоретических и экспериментальных исследований аномально низкого трения возникающего в условиях упругого взаимодействия микрорельефа элементов трибосистем.*

**Введение.** Проводя анализ работы трибосистем в условиях аномально низкого трения и изнашивания рядом ученых [1, 2, 3, 4, 5], использовались волны различной природы к структурированию поверхностного слоя, однако, как канал диссипации внешней энергии эта составляющая внешнего трения не рассматривалась.

Одна из первых попыток привлечения волновой составляющей как канала диссипации выполнена в работе [3]. Автор считает, что в условиях аномально низкого трения и изнашивания на поверхности образуется квазиупругий слой, в центральной части которого гипотетически возможна гидродинамическая деформация, а на периферии в переходной зоне следует ожидать интенсивную ротационную упругопластическую деформацию, аналогичную структуре вихреобразование в пристеночном слое при течении жидкости. Такой подход, на наш взгляд, можно считать частным случаем проявления волновой составляющей силы трения как канала диссипации внешне подводимой энергии.

**Анализ публикаций.** Проводя анализ работ по исследованию ультразвуковых и вибрационных колебаний в трибологии [6, 7, 8], можно сделать вывод, что практически во всех этих работах волновая составляющая силы трения, введенная в выражение для силы трения со знаком минус авторами работ [8, 9], присутствует в виде конечного результата при внешнем волновом воздействии на трибосистему.

**Цель исследований.** Задачей настоящей работы является формирование научной парадигмы перевода трибосистем от нормального механохимического изнашивания к аномально низкому трению и износу, который обусловлен квазиупругим взаимодействием на пятнах фактического контакта трибоэлементов.

**Изложение основного материала.** Термодинамический анализ каналов диссипации внешне подводимой энергии при внешнем трении проведенный в работах [7, 10] показал, что существуют два уровня самоорганизации равновесная и неравновесная. В первом случае,

существуют диссипативные равновесные структуры, во втором случае диссипативные неравновесные структуры. Для первого случая равновесие достигается по каналу термодинамической энтропии, а во втором случае саморегулирование происходит по каналу избыточного производства энтропии.

По мнению авторов [11, 12, 13], которые проводили анализ внешнего трения с термодинамических позиций производство избыточной энтропии, может быть только положительным. В тоже время в исследованиях процессов самоорганизации в химических технологиях [14] показано, что в условиях неравновесной самоорганизации производства избыточной энтропии может изменяться, как в положительном, так и в отрицательном направлении. Т.е. признается одновременное присутствие процессов диссипации и антидиссипации, которые могут проходить как с выделением тепла, так и с ее поглощением.

Класс трибосистем, которые работают по этому принципу и созданных в результате естественных эволюционно-трансформационных процессов движения могут быть наделенными свойствами «искусственного интеллекта». Вполне логично применение к анализу таких трибосистем помимо синергетического и термодинамического подходов – кибернетического, который апеллируют прямыми и обратными связями, реализующими принципы эволюции живой биологической материи в неживой.

Так проводя анализ кинетического взаимодействия такого рода трущихся тел В.А. Вейником [15] выдвинута гипотеза о возможности как нулевого, так и отрицательного трения в трибологии на основе признания одновременного присутствия процессов диссипации и антидиссипации при упругом взаимодействии элементов трибосистем. Возможность достижения аномально низкого трения и износа связывается автором работы [16] с необратимым поглощением энергии деформации за счет протекания обратимой упругопластической деформации. Также, как и в работе [15] тепловой эффект при контактном взаимодействии определялся суммой двух составляющих статической и динамической удельных компонентов диссипации энергии

$$q = \Delta u_T + \vec{q},$$

где  $\Delta u_T$ ,  $\vec{q}$  – статическая и динамическая удельные компоненты диссипации энергии, которая подводится к трибосистеме.

С материаловедческой позиции при обычном трении главными источником накачки в поверхностном слое служат линейные и точечные дефекты в металлах. К точечным относятся энергетические, электронные и атомные. Наиболее распространены энергетические дефекты - фононы - кванты волн растяжения-сжатия и сдвига (звуковые волны). Тепло в кристалле распространяется также в виде механических волн со звуковой

скоростью. В квантовой механике распространение звуковых волн, как и электромагнитных, рассматривается как движение частиц – фононов. Энергия фонона, как и фотона, по формуле Планка равна  $h\nu$ . При аномально низком трении и изнашивании превалирующее значение при энергообмене имеют именно энергетические дефекты.

Современные представления о трении и износе с позиции синергетики и термодинамики неравновесных систем [8], физических теорий позволили установить физический смысл коэффициента трения, как отношение кинетической составляющей внешнего трения к гравитационной (квазимассой трения совершающей на пути движения работу) [15]. Такой подход уже включает участие волновой составляющей в саморегулирование энергетических потоков и их преобразование (диссипации) трибосистемах обладающих искусственным интеллектом. Основываясь на таком подходе, аномально низкое трение следует рассматривать как пограничное состояние материальной среды такое же, как сверхпроводимость, сверхпластичность и т.д.

Достижения современных физических теорий в области механики твердого деформируемого тела позволяют в корне изменить представления на механизм аномально низкого трения и изнашивания. До настоящего времени в качестве основного принципа инженерии поверхностного слоя в трибосистемах является подбор трибоэлементов создающих в процессе приработки положительный градиент по твердости. В условиях аномально низкого трения и изнашивания отличительной особенностью является переход от пластического контакта к упругому контакту. Это направление теоретически представлено в работе [15] и экспериментально реализовано в работе [9].

В процессе энергетического обмена при аномально низком трении, в котором обеспечивается баланс между молекулярно-механической и волновой составляющей силы трения необходимо учитывать, что волновой канал диссипации энергии преобразует несбалансированную часть внешнего трения во внутреннее трение [17].

Таким образом, критерий необратимости преобразования энергии при аномально низком трении не нарушается и закон сохранения энергии при аномально низком трении и изнашивании соблюдается.

Проведенный анализ механизмов диссипации внешне подводимой энергии позволяет сделать вывод, что совершенство трибосистем  $\mu$  (коэффициент трения) при аномально низком трении оценивается величиной отношения кинетической  $F_{fr}$  и гравитационной  $N$  составляющих внешнего трения:

$$\mu = \frac{F_{fr}}{N},$$

С одной стороны – это параметр, характеризующий обобщенно сопротивление относительно перемещению (движению) поверхностей, он отражает долю энергии, которая «уничтожается» трением в виде запасенной скрытой энергии, по отношению к работе внешних сил (энергии внешнего относительного движения). Нагрузка  $N$  воспринимается как квазимасса трения, совершающая на пути работу. С другой стороны – это обобщенная характеристика повреждаемости, так как он (коэффициент трения) определяется плотностью скрытой энергией, характеризующей меру дефектности или совершенства структуры и являющейся обобщенным параметром меры повреждаемости либо безызносности [15].

Принятый нами анализ физического смысла коэффициента трения позволяет выдвинуть научную парадигму реализации условий достижения аномально низкого трения и износа при внешнем трении реальных трибосистем (рис. 1).

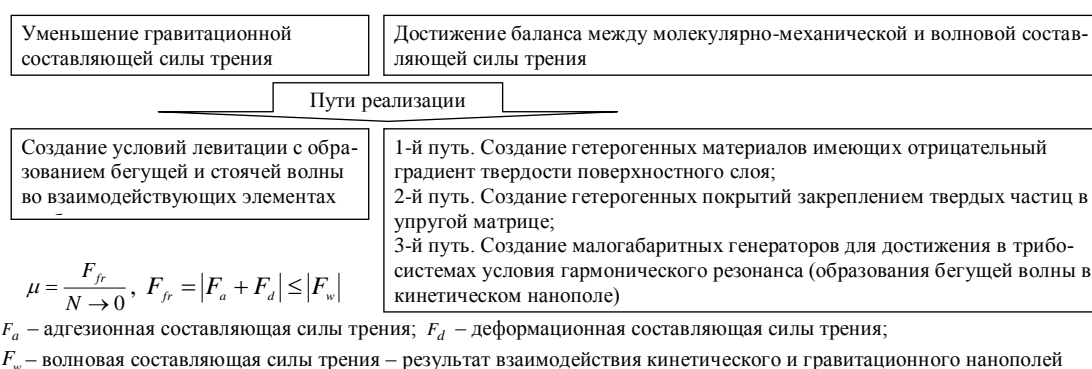


Рисунок 1 – Пути реализации достижения аномально низкого трения и износа в реальных трибосистемах

Экспериментальные и теоретические исследования аномально низкого трения и износа проведенные в соответствии с данной парадигмой [7, 8, 10, 18] позволяет сформировать практические рекомендации по реализации данного эффекта для высоконагруженных элементов агрегатов.

Общим требованием к инженерии поверхности при реализации аномально низкого трения и износа является квазиупругий слой на поверхности трения. Достижения этого условия возможно различными способами, среди которых особое внимание в силу простоты практической реализации следует отнести управление тепловым потоком [7], программное нагружение в процессе приработки [10, 19], создание многослойных покрытий [9], закрепление твердых включений в упругой матрице (например, электроискровой наплавкой).

Проиллюстрируем достижения условий аномально низкого трения и износа в результате экспериментальных исследований, полученных впервые в результате поиска оптимального нагрузочного режима приработки реальных трибосистем [20]. Ранее проведенный анализ дает основания



Степень совершенства диссипативных структур трения в области совместимости, возможно, оценивать, сопоставляя развороты структурных элементов в пропорции к полному обороту (осцилляции) [21]. В дальнейших исследованиях уровень фрактального совершенства оценивалось нами с использованием данного подхода и математического аппарата теории суперструн Намбу-Гото [25].

Для определения скорости нагружения на первом этапе проводят ступенчатое нагружение в соответствии с рекомендациями [19]. В частности, на рис. 3 представлены результаты перевода трибосистемы от нормального трения к аномально низкому трению и износу трибосистема 30ХГСНА–30ХГСНА в рабочей среде масла М-10Г2к.

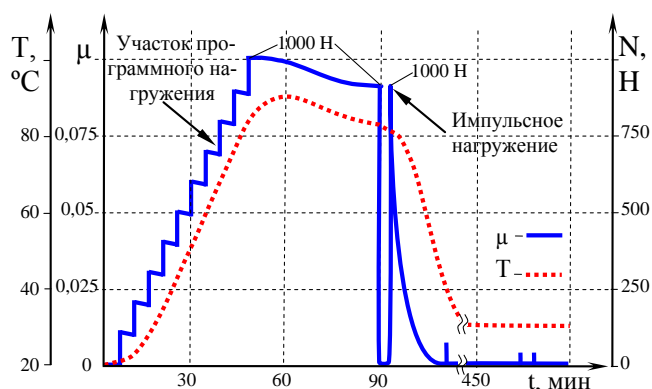


Рисунок 3 – Характер изменения основных трибологических параметров:  $T$  – температура в контакте;  $\mu$  – коэффициент трения;  $N$  – нагрузка, при программном нагружении, трибосистема сталь 30ХГСНА – сталь 30ХГСНА

Первый этап деформации – этап накопления скрытой энергии деформации до состояния предразрушения – близкого к критической плотности скрытой энергии [16].

По мере возрастания в деформируемых объемах материала плотности скрытой энергии (упрочнение – механическая активация), скорость процесса деформационного упрочнения уменьшается и асимптотически стремится к нулю. При этом объемы деформируемого металла характеризуются максимальным упрочнением достигается предельно неустойчивое термодинамическое состояние – точка бифуркации.

При импульсном нагружении есть два пути диссипации накопленной скрытой энергии. Первый путь – это разрушение деформируемого объема, связанный с высвобождением накопленной скрытой энергии деформации в результате процессов схватывания [16]. Второй – это путь естественно эволюционный и наиболее благоприятный – реализовать диссипативный процесс и приспособиться к внешним условиям (принцип максимальной надежности). Тем более, что система находится в условиях именно, благоприятствующих развитию второго пути эволюции – равномерного всестороннего сжатия [26].

В нашем случае программное нагружение трибосистемы создает благоприятные условия реализации эволюции трибосистемы (перехода к аномально низкому трению и изнашиванию).

Исследование микротвердости по глубине поверхностного слоя неподвижных элементов данных трибосистем показало, что после программного нагружения поверхностный слой имеет большую твердость, чем базовая трибосистема, и глубина упрочнения увеличивается более чем в 2 раза и достигает 75 мкм.

Особенностью изменения микротвердости при программном нагружении является формирование на глубине 20 мкм области, в которой внешнее трение преобразуется во внутреннее трение. По аналогии с нанесением подслоя в многослойных ионно-плазменных покрытиях. Именно эта область является концентратором потенциальной энергии при контактном взаимодействии, которая превращается в кинетическую, что формирует кинетическое нанополе, и волновую составляющую силы трения  $F_w$ . С термодинамических позиций эта область выполняет функцию энтропийного насоса преобразующего внешнее трение во внутреннее трение. Практическая значимость обнаруженного эффекта состоит в возможности его реализации при конструировании многослойных ионно-плазменных и других износостойких покрытий.

После выполнения программного нагружения, эффект аномально низкого трения и износа сохраняется только на время работы трибосистемы. После перерыва в работе трибосистемы (превалирующее значение имеют именно энергетические дефекты) для нее необходимо повторное выполнение программного нагружения (рис. 3), чтобы вновь синхронизировать все параметры волнового процесса до условий образования в ней бегущей волны.

**Выводы.** В соответствии выдвинутой гипотезой существования волновой составляющей силы трения физический смысл коэффициента трения представляется отношением кинетической и гравитационной составляющих сил трения. При переходе к аномально низкому трению и изнашиванию кинетическая составляющая является приоритетной.

Установлено, что переход к аномально низкому трению и изнашиванию обусловлено переходом к квазиупругому взаимодействию на пятнах фактического контакта трибоэлементов. Градиент физико-механических свойств поверхностного слоя в этом случае имеет общую закономерность, а именно на поверхности должен находиться квазиупругий слой, под поверхностью упругопластический.

Установлено, что несбалансированная часть внешнего трения в условиях аномально низкого трения и изнашивания переводится во внутреннее трение, поэтому второй закон термодинамики не нарушается.

### Список литературы

1. Протасов Б.В. Энергетические соотношения в трибосопряжении и прогнозирование его долговечности: Моногр. / Б.В. Протасов. – Саратов: Изд. Сарат. ун-та, 1979. – 152 с.
2. Владимиров В.И. Проблемы физики трения и изнашивания / В.И. Владимиров // Физика износостойкости поверхностей металлов: Сб. науч. тр. Физико-технический институт, – 1988. – С.8–41.
3. Погодаев Л.И. Структурно-энергетические модели поведения (надежности) материалов при импульсном нагружении / Л.И. Погодаев // Трение, износ, смазка. – 2013. – Т. 15, №57. <http://www.tribo.ru/>
4. Шлихтинг И.И. Теория пограничного слоя. / И.И. Шлихтинг – М.: Наука, 1974. – 712 с.
5. Васильев А.С. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / А.С. Васильев и др. – М.: Машиностроение, 2005. – 384 с.
6. Nosonovsky M. Friction-Induced Vibrations and Self-Organization. Mechanics and Non-Equilibrium Thermodynamics of Sliding Contact / M. Nosonovsky V. Mortazavi // Taylor & Francis Group, 2014. 331 p.
7. Стадниченко В. Н. Синергетическая концепция самоорганизации в трибологических системах при управлении тепловым потоком / В.Н. Стадниченко, О.Н. Трошин // Вісник технічного університету «ХП»: зб. наук. пр. Темат. вип.: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХП». – 2007. – № 17 – С. 49–62.
8. Stadnichenko V.M. Gray's Paradox and Wave Solutions in Explaining Anomalously Low Friction and Wear in Tribology / V.M. Stadnichenko, O.M. Troshin // International Journal of Materials Science and Applications. 2016. Vol. 5, № 1. – P. 23–30.
9. Стадниченко В.Н. Классификация видов nanoизноса по значению коэффициента диссипации подводимой внешней энергии к трибосистеме / В.Н. Стадниченко, О.Н. Трошин, Н.Г. Стадниченко и др. // Збірник наукових праць ХУ ПС. – 2011. – № 1. – С. 51-61.
10. Трошин О.Н. Методические аспекты неравновесной самоорганизации трибосистем / О.Н. Трошин, В.Н. Стадниченко, Н.Г. Стадниченко и др. // Системи озброєння і військова техніка. – Х.: ХУПС, 2014. – № 1(37). – С. 233–241.
11. Полак Л.С. Самоорганизация в неравновесных физико-химических системах / Л.С. Полак, А.С. Михайлов. – М.: Наука, 1983. – 286 с.
12. Иванова В.С. Синергетика: прочность и разрушение металлических материалов / В.С. Иванова. – М.: Изд. РАН. – 1992. - 160 с.
13. Погодаев Л.И. и др. Структурно-энергетическая модель изнашивания / Л.И. Погодаев // Трение и износ. – 2001. – Т. 22, №2. – С. 168–172.
14. Хакен Г. Синергетика: иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах: Пер. с англ. / Г. Хакен – М.: Мир, 1985. – 423 с.



15. Вейник А.И. Термодинамическая пара / А.И. Вейник. – Мн.: Наука и техника, 1973. – 383 с.
16. Федоров С.В. Общие закономерности эволюции трения с позиций самоорганизации и синергизма / С.В. Федоров. – В кн.: Известия КГТУ. – Калининград, 2007. – №11. – С. 22–31.
17. Шевеля В.В. Трибохимия и реология износостойкости: Моногр. / В.В. Шевеля, В.П. Олександренко. – Хмельниц.: ХНУ, 2006. – 278 с.
18. Трошін О.М. Гіпотеза в поясненні аномально низького тертя та зношування в трибології / О.М. Трошін // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем. – 2015. – Вип. 12. – С. 178–190.
19. Гиндин И.А. Физика программного упрочнения / И.А. Гиндин, И.М. Неклюдов. – К.: Наукова думка, 1979. – 184 с.
20. Стадниченко В.Н. Методика проведения ускоренных ресурсных испытаний аксиально-поршневых гидромашин с применением метода акустической эмиссии / В.Н. Стадниченко, З.Я. Лурье, А.И. Жерняк // Сборник научных трудов ХГПУ. Информационные технологии: Наука, техника, технология, образование, здоровье. – 1998. – Вып. 6. Ч. 2. – С. 64–78.
21. Рубан И.В. Автоматизация процессов лабораторных и стендовых испытаний в триботехнике / И.В. Рубан, О.Н. Трошин, С.В. Смирнов и др. // Системи озброєння і військова техніка. – Х.: ХУПС, 2010. – №3(23). – С. 150–153.
22. Васильев А.С. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / А.С. Васильев, Ю.М. Дальский, А.И. Золотаревский. – М.: Машиностроение, 2005. – 384 с.
23. Юркова А.И. Исследование механизма диспергирования железа при интенсивной пластической деформации трением / А.И. Юркова, А.В. Белоцкий, А.В. Бякова // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. – 2006. – Т. 4, вып. 2. – С. 483-500.
24. Yurkova A. Mechanical behavior of nanostructured iron fabricated by severe plastic deformation under diffusion flow of nitrogen / A. Yurkova, A. Belots'ky, A. Vyakova et. al. // Materials Science Forum. – 2006. – Vols. 503-504. – P. 645-650.
25. Каку М. Введение в теорию суперструн: Пер. с англ. – М.: Мир, 1999. – 624 с.
26. Бриджман П.В. Исследования больших пластических деформаций и разрыва. – М.: Изд. Иностранная литература, 1995. – 444 с.

#### **Анотація**

### **НАУКОВА ПАРАДИГМА ДОСЯГНЕННЯ АНОМАЛЬНО НИЗЬКОГО ТЕРТЯ В ТРИБОЛОГІЇ**

Трошін О.М.

*В статті представлена наукова парадигма досягнення аномально низького тертя і зношування в трибології з позиції сучасних фізичних теорій, а також результати теоретичних і експериментальних досліджень аномально низького тертя, що виникає в умовах пружної взаємодії мікрорельєфу елементів трибосистем.*

**Abstract**

**SCIENTIFIC PARADIGM OF ACHIEVEMENT ANOMALOUS LOW FRICTION IN TRIBOLOGY**

Troshin O.

*In the article, there is the presented scientific paradigm of achievement anomalous low friction and wear in tribology from position of modern physical theories, and results of theoretical and experimental researches anomalous low friction, that there is tribosystem in the conditions of resilient co-operation of micro relief of elements.*