

УДК 621.891

О.Н. Трошин<sup>1</sup>, В.Н. Стадниченко<sup>2</sup>, Н.Г. Стадниченко<sup>1</sup>, Р.А. Жуков<sup>1</sup>, С.В. Красницкий<sup>1</sup><sup>1</sup>Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков<sup>2</sup>Национальный авиационный университет, Киев

## МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ НЕРАВНОВЕСНОЙ САМООРГАНИЗАЦИИ ТРИБОСИСТЕМ

*В статье обоснованы методические решения для управления процессами трения и износа путем реализации различных механизмов диссипации внешней подводимой энергии в трибосистемах в условиях неравновесной самоорганизации.*

**Ключевые слова:** трибосистема, энтропия, износ, автоматизированная система трибодиагностики.

### Введение

Работоспособность оборудования, используемого в нефтехимической, газоперерабатывающей, энергетической, аэрокосмической и других отраслях народного хозяйства, в значительной степени зависит от гарантированной надежности изделий. Трибосистемы (ТС) данных изделий испытывают высокие механические и температурные нагрузки, влияющие на окружающую и агрессивных сред.

Использование таких эффектов, как «безызносное» трение может быть положено в основу создания ТС, обладающих высоким ресурсом и максимальной надежностью. При этом такие особенности, как механизм разрушения контактных поверхностей ТС в процессе их эксплуатации, действие смазочных материалов, а также вопросы качества поверхностей, относящиеся к изучению их шероховатости и механизмов их контакта, отступают на второй план. Наибольшее значение приобретают вопросы образования различных тонкопленочных структур при трении, особенностей их смазочного действия, а также процессов самоорганизации, имеющих место в зоне контакта твердых тел с образованием фрактальных пространственных и временных структур, например ротационных.

Автор работ по нелинейной термодинамике и самоорганизации неравновесных систем Илья Пригожин установил, что некоторые открытые системы в условиях далеких от равновесия, становятся неустойчивыми [1 – 4], их макроскопические свойства при этом радикально изменяются. В ТС, это проявляется в образовании диссипативных структур двух типов: первый тип – равновесные структуры, которые образуются в процессе приработки и по их формированию достигается минимальное производство энтропии; диссипативные структуры второго типа – неравновесные, их устойчивые свойства определяются знаком избыточного производства энтропии. Условием их образования в ТС является подвод дополнительной внешней энергии [5]. Данные структуры работают по принципу поддержания макси-

мального уровня надежности при изменении внешних условий трения, это достигается поддержанием равенства динамических процессов плюс и минус диссипации [6]. Как это устроено в биологических системах, причем в каждом отдельном случае, вероятно, существует свой термодинамический порог самоорганизации, который четко разделяет классы равновесных и неравновесных диссипативных структур, возникающих при больших отклонениях от положения равновесия.

Именно здесь проявляется эффект самоорганизации и когерентное поведение подсистем, которое выражается в переходе ТС к работе в условиях аномально низкого трения и изнашивания. По сути, это открытие новых областей в физике трения и износа, где термодинамически возможным является самоорганизация новых структур, которая приводит к более совершенному механизму трения, чем граничное.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Самоорганизация в синергетике трактуется, как некая способность любых объектов проявлять свойства характерные для поведения биологических и социальных объектов, причем их усилия имеют четко выраженную направленность на поддержание порядка и организованности [3].

Следует отметить, что самоорганизация не является универсальным свойством материи, а существует лишь при определенных внутренних и внешних условиях. Вместе с тем, это свойство не связано с каким-либо особым классом веществ: эффект Бенара, феномен Гюйгенса, лазеры, переход от ламинарного течения к турбулентному, являются доказательством этого. Последний пример особенно интересен применительно к триботехнике. Было замечено, что дельфины при плавании развивают скорость, значительно больше той, которую можно было ожидать с учетом их геометрической формы. Этот феномен обусловлен тем, что тело дельфина обладает малым сопротивлением трению, объясняющимся упругостью кожи, позволяющей пограничному слою на теле дельфина оставаться ламинарным даже при очень больших числах Рейнольдса [7]. На основании приведенного выше эф-

фекта, проводятся разработки перспективных летательных и подводных аппаратов с полной ламиризацией пограничного слоя. Это дает возможность снизить коэффициент сопротивления тела к окружающей среде в семь и более раз. Данная идея, подсказанная самой природой, использована авторами работы [8] при разработке технологии триботехнического восстановления направленной на создание на поверхности трения металлокерамического слоя, поверхность которого, абсолютно упругая (окись алюминия), а подповерхностный слой – аморфный (металлосиликат). Диссипация внешней подводимой энергии при трении в данной ТС происходит за счет упругопластических циклических деформаций металлокерамического слоя в контактной области. Авторами [8] основополагающе в объяснении различных механизмов самоорганизации с позиции синергетики, названной эффектом «бегущей» волны, которая обуславливает практическую безыносность ТС.

В данное время понятие аттрактора используется в синергетике, которое авторами работы [1] трактуется как конечная область неминуемого схождения фазовых траекторий движения сложной системы. Аттрактором может выступать либо точка (устойчивый аттрактор), либо иное более сложное образование, то есть определенная область, внутри которой, траектории системы совершают произвольные и не поддающиеся регулярному описанию блуждания.

Вспомогательную роль играют понятия хаоса и порядка. Они употребляются в качестве характеристик, описывающих взаимовлияния процессов, и также характеризуют явления самоорганизации: «Сам хаос имеет тонкую, иногда невидимую для внешнего наблюдателя структуру, например, в турбулентном течении. А порядок – это организованный хаос». Синергетика дает свое особое значение понятию хаоса, как потенциальной возможности выбора, фактора способствующего переходу системы на другой уровень порядка, организованности. Порядок и хаос являются неотъемлемыми составными частями, и продуктами коррелированных эволюционных процессов в различных системах, в том числе и триботехнических.

Для того чтобы в открытой системе происходило структурирование, т.е. радикально возрастала упорядоченность, экспорт энтропии должен превысить некоторое критическое значение. Для экспорта энтропии, превышающего ее внутреннюю продукцию, необходим своего рода «энтропийный насос», выкачивающий энтропию из открытой системы, либо перераспределяя ее между элементами с разным энтропийным ресурсом. Такой насос может действовать либо извне, либо изнутри. Проводя анализ работ [1, 4, 9, 10], можно записать термодинамические условия работы этого насоса:

$$deF > dE + TdiS,$$

где  $deF$  – отток свободной энергии;  $dE$  – изменение внутренней энергии;  $T$  – температура системы;  $diS$  – энтропия, произведенная внутри системы.

Таким образом, для того, чтобы происходил экспорт энтропии, ее отток из системы, необходимым является подача свободной энергии в количестве, превышающем изменение внутренней энергии и вклад, определяемый продукцией энтропии.

Если рассматривается процесс при непостоянном объеме, а при постоянном давлении, необходимым является использование свободной энергией Гиббса, а несвободной энергией Геймгольца. В этом случае уравнение энтропийного насоса приобретает вид:

$$deG > dH + TdiS,$$

где  $deG$  – изменение свободной энергии Гиббса системы;  $dH$  – изменение энтальпии системы.

Поскольку, в стационарных условиях, когда внутренняя энергия или энтальпия не меняется,  $deF = deG > TdiS > 0$ , то для поддержания стационарного состояния системы, необходимо вводить в систему свободную энергию.

Данное условие, дает объяснение появлению при определенных условиях диссипативных структур, однако, оно не дает возможности объяснить механизм их образования ни их поведения. Особое значение в свете этого приобретает понятие структуры, являющиеся основным для всех наук, занимающихся теми или иными аспектами процессов самоорганизации, при любой степени общности и предполагающие некую «жесткость» объекта – способность сохранять тождество самому себе при различных внешних и внутренних изменениях.

Если использовать терминологию нелинейной термодинамики [2], можно сказать, что все системы содержат подсистемы, которые непрестанно флуктуируют. Иногда отдельная флуктуация или комбинация флуктуаций может стать (в результате положительной обратной связи) настолько сильной, что существовавшая прежде организационная структура не выдерживает и разрушается. В этот переломный момент, называемый точкой бифуркации, принципиально невозможно предсказать, в каком направлении будет происходить дальнейшее развитие: станет ли состояние системы хаотическим, или она перейдет на новый, более дифференцированный и более высокий уровень упорядоченности или организации, называемой диссипативной структурой.

В связи с этим чрезвычайно важным является оценка устойчивости неравновесных состояний диссипативных структур. Данная задача решена на основе уравнения баланса избыточного производства энтропии [2].

**Постановка задачи.** Проведенный выше анализ термодинамических условий работы ТС дает нам основание предположить наличие двух механизмов са-

моорганізації: рівновесного упорядоченого, при якому ступінь нерівновесності зменшується, а енергія виділяється, і нерівновесного упорядоченого, при якому ступінь нерівновесності зростає, а енергія витрачається. Кожній з гілок самоорганізації відповідають два види дисипативних структур, що утворюються на поверхнях тертя. Рівновесно упорядочені, що виникають в процесі первинної і вторинної приробки в ТС [8], і нерівновесно упорядочені, що виникають в ТС за межами стійкості за рахунок цілеспрямованого впливу ізвне (теплофізичного, силового, електрофізичного, радіаційного і др.) [11].

Цілеспрямоване вплив ізвне, веде ТС в сильно упорядочене і далеке від початкового стану. С позиції фізики твердого тіла цей перехід пов'язаний з поступовим подолаттям наявного потенціального бар'єра, і може розглядатися, як фазовий перехід другого роду. Искусственно возбуждаемую ТС цілеспрямовано визначають двома стійкими станами, що характеризуються відповідно рівнями тертя  $E_1$  і  $E_2$ , а також енергетичним бар'єром  $Q$ . Спонтанний перехід системи з початкового стану в рівновесне стану  $E_1$ , можливий з допомогою звичайної приробки. Однак самопроизвольный перехід ТС в стану  $E_2$  не відбудеться, оскільки ці стани розділяє енергетичний бар'єр  $Q > E_1$ , подолаття якого за рахунок сили тертя практично неможливо. Для радикального зниження рівня тертя і інтенсивності износа необхідно додаткове вплив на ТС з енергією, що забезпечує подолаття бар'єра  $Q$ , і наступний перехід системи в стану  $E_2$ . Для дисипативних структур другого роду, де стійкі стани на різних навантажувально-швидкісних режимах досягаються рівновесієм плюс і мінус дисипації такого роду переходи з одного рівня на інший цілком досяжні.

Цінність такого підходу при аналізі дисипативних структур і процесів самоорганізації ТС полягає в більш глибокому розумінні зв'язку тертя з основними законами природи, розробці методических рішень для управління процесами тертя і износа, що є основною задачею фундаментальних і прикладних досліджень в даній області науки і техніки.

### Изложение основного материала

Приведенні нижче дослідження базуються на науковій гіпотезі в основі, якою покладена енергетическа модель тертя і изнашивания [8, 12]. Данна гіпотеза дає можливість при описанні динаміки будь-яких макроскопіческих систем, через змінення термодинаміческих потенціалів, враховувати адсорб-

ційні, дифузійні і інші ефекти.

Применительно к описанию процессов трения и изнашивания, функциональная зависимость скорости изнашивания от термодинамических факторов имеет вид:

$$J = f(U, S, t),$$

где  $J$  – интенсивность изнашивания;  $U$  – внутренняя энергия;  $S$  – энтропия;  $t$  – время.

В основу данной гипотезы положены следующие идеи: в поверхностном слое изнашиваемого материала можно выделить эффективный объем взаимодействий, находящийся в состоянии локального динамического равновесия; процессы трения и изнашивания могут быть описаны уравнениями энергетического баланса; скорость деструкции контролируется скоростью производства энтропии.

Уравнение баланса энтропии, записанное для локальной области (локальное термодинамическое равновесие) имеет вид:

$$\sigma[S] = \frac{\rho dS}{dt} + \text{div}S,$$

где  $\sigma[S]$  – скорость возникновения, или производства энтропии внутри данной области;  $\frac{\rho dS}{dt}$  – скорость прироста энтропии в данной области;  $\text{div}S$  – скорость оттока энтропии из данной области в окружающую среду, или в контртело.

Однако подобная модель, не учитывает тот факт, что в процессе деформации активируются самоорганизующиеся дисипативные процессы, в результате которых перед разрушением в деформируемом материале, в ряде случаев вместо ожидаемого хаоса и деструкции наблюдается появление высокоупорядоченных структур, т.е. из системы непрерывно «откачивается» энтропия, образуемая в ходе накопления дефектов. Кроме того, известен факт, что на стадии истощения пластичности преимущественная роль отводится коллективным процессам, охватывающим масштаб больший, чем размеры локальных областей внутри дислокационных ячеек, учет которых в данной модели не предусмотрен.

Принципиально важным при оценке термодинамических процессов в ТС является учет взаимовлияния основных факторов. Благодаря разности температур возникает тепловой поток отличный от нуля. В процессах производства энтропии всегда присутствует поток, т.е. изменение некоторой физической величины – и сила, создающая этот поток. В этом случае потоком является, поток энергии  $\frac{dE}{dt}$ .

Движущая сила – разность температур:

$$\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2}.$$

Таким образом, возможно, представить функцию диссипации энергии в виде:

$$\sigma = \frac{dE}{dt} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right).$$

Так как  $\sigma$  – есть производство энтропии к единице объема, то  $E$  это энергия, приходящаяся на единицу объема.

Условие  $\sigma > 0$  выполняется. Действительно,  $\frac{dE}{dt}$  – поток тепловой энергии от  $T_1$  до  $T_2$  положителен при  $T_1 > T_2$ , но при этом  $\left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) > 0$ . Напротив, если  $T_1 < T_2$ , но при этом  $\left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) < 0$ .

Функция диссипации выражается произведением потока и силы, его вызывающей, она является универсальной, как для электрических, химических явлений, так, и для ТС. Данный факт позволяет допустить предположение о применимости функции диссипации при описании напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя материалов трещинных узлов в процессе их работы.

Основываясь на кибернетической модели саморегулирования ТС [13], следует отметить, что в них саморегулирование осуществляется с помощью отрицательной обратной связи по каналу энтальпии. Однако исследования процессов самоорганизации открытых термодинамических систем [1, 2] позволяют допустить возможность саморегулирования системы и по каналу положительной обратной связи, роль которой играет структура поверхностных слоев материалов, модифицирующихся при трении.

Например, переход от микропластической деформации при трении к макродвижению происходит через точку бифуркации с изменением реологического механизма диссипации накопленной внутренней энергии. Другим примером подобного саморегулирования ТС является зарождение при пластической деформации материала ротационных структур обеспечивающих аномальный массоперенос в поверхностных слоях [13]. Переход от деформации скольжения к деформации ротационной, аналогичен переходу от ламинарного течения жидкости к турбулентному. Точкой бифуркации в этом случае является достижение критической плотности дислокаций.

Ротационная деформация заключается в разбивании материала на взаимно разориентированные объемы, дальнейшее уменьшение их размера и увеличение углов их разориентации. Ротационная пластичность протекает за счет зарождения и распространения линейных дефектов дислокаций. Последнее при поворотах играют ту же роль, что, и дислокации при сдвигах. Из анализа работы [14] следует, что большим и особенно циклическим деформациям

свойственны ротационные механизмы пластичности.

Существуют и более сложные механизмы саморегулирования открытых термодинамических систем, которые в трибологии не нашли практического применения. Одним из таких механизмов саморегуляции с положительной обратной связью является механизм восходящей диффузии, эффект Горского. Управляющим параметром, при котором проявляется направления градиента диффузии, при достижении критического значения между напряжениями растяжения и сжатия на поверхности и в глубине деформированной пластины.

Весьма интересным, как с теоретической, так и с практической стороны является термодинамический анализ кинетического взаимодействия квазиупругих тел проведенных автором в работе [6].

Рассматривая механизмы диссипации энергии в безпорном двигателе Толчина (такие двигатели способны перемещаться, не опираясь на что бы то ни было: землю, воду, воздух, реактивную струю). Они могут двигаться только под действием внутренних сил изолированной системы, т.е. путем превращения активностей различных внутренних (внутриструктурных) взаимодействий в ее кинетическую энергию (скорость). Автор работы [6] пришел к важному выводу о возможности получения некомпенсированной силы только за счет разницы в состоянии соударяющихся тел. Рассмотренный случай несоблюдения закона сохранения количества движения может быть применен для существенного снижения параметров, характеризующих процессы изнашивания в ТС.

Если рассмотреть локальные взаимодействия микрошероховатостей в контактной области ТС, по аналогии с примером рассмотренном в данной работе, то эффект диссипации (количество тепла диссипации  $Q_d$ ) при упругом взаимодействии микрошероховатостей при условиях равенства взаимодействующих масс (микрошероховатостей на поверхности) подвижного и неподвижного трущихся тел можно оценить следующим выражением [6]:

$$Q_d = (1/2)\delta P_{мд} m = (1/2)m(\omega_c^2 - \omega^2), \quad (1)$$

где  $\delta P_{мд}$  – разность кинетических энергий;  $m$  – присоединяемая (отсоединяемая) масса;  $\omega_c$  – начальная скорость;  $\omega$  – конечная скорость.

Рассмотрим пути диссипации внешней подводимой энергии при упругом взаимодействии масс в ТС на уровне микрошероховатостей.

При упругом ударе  $Q_d$  зависит от степени совершенства удара. В условиях абсолютного упругого удара тел о неподвижное препятствие скорость массы до удара равна ее скорости после удара. Торможение массы сопровождается выделением тепла

диссипации в количестве  $Q_D$ , а ее разгон до прежней скорости – поглощением того же количества тепла –  $Q_D$ . В результате эффект экранирования (диссипации) обращается в нуль. Это следует из (1), если подставить в нее суммарный поток кинетической составляющей от общей энергии тела, то он будет равным нулю. Кроме кинетической составляющей в каждом теле присутствует субстанциональная и гравитационная. Вместе с тем наличие в (1) разность квадратов скоростей свидетельствует о чрезвычайной важности того факта, какая из скоростей выше – начальная или конечная. Если при ударе начальная скорость  $\omega_c$  больше конечной  $\omega$ , т.е. активность кинетической составляющей от общей энергии тела вследствие эффекта экранирования падает, тогда теплота диссипации положительна, она выделяется (плюс-трение). Если начальная скорость  $\omega_c$  меньше конечной  $\omega$ , т.е. активность кинетической составляющей от общей энергии тела вследствие эффекта экранирования возрастает, тогда теплота диссипации, отрицательна, она поглощается (минус-трение).

С учетом вышеизложенного энергетика поверхности не позволяет рассматривать шероховатость только с геометрических позиций. В теории диссипации известен интересный физический эффект создания ячеек Бернара. Если к поверхности постоянно подводится энергия, то по достижении ее определенного значения оказывается необходима ее более интенсивная отдача (рассеяние) в окружающую среду. Возникает бифуркация с последующей самоорганизацией структуры поверхности, при этом самопроизвольно поверхность разбивается на отдельные элементы, каждый из которых диссипирует более интенсивно, чем до бифуркации. Что позволила авторам работы [15] проанализировать энергообмен между трущимися поверхностями путем представления шероховатостей в виде энергетических ячеек, каждая из которых отдает энергию в контртело, и воспринимает ее от контртела. Этот энергообмен оценивается при усредненных по всей поверхности энергетических потоках. В случае если рассматривать эти потоки локально, то также достижимы условия плюс и минус-трения [6].

Если реальную ТС представить в виде бесконечного множества взаимодействующих упругих микрошероховатостей, то основной причиной минимизации величины параметров (скорость изнашивания, температура контактной области, сила трения и т.д.), будет определять кинетическое нанополе (реакция массы, на внешнее воздействие возникающая в локальных точках упругого взаимодействия на уровне микрошероховатости трущихся тел), в котором возможно достижение условий, когда оба эффекта экранирования строго равны между собой.

Потому что работа сил нанополя всегда равна работе замедления, или ускорения массы, но знаки этих работ противоположны. Величины напряжений и связанных с ним силы трения на поверхности контактирования в этом случае, может быть оценена с помощью информационно-статистической модели.

Количество диссипативной составляющей  $d\Theta_D$  – выделившегося либо поглощенного тепла прямо пропорциональна изменению активности кинетической составляющей нанополя  $dP_D$ , и величине перенесенного тепла в результате локальных взаимодействий  $dE$ , и обратно пропорциональна абсолютной температуре носителя, которая может быть описана стохастическими уравнениями, итоговые решения которых могут быть представлены уравнением [6]:

$$d\Theta_D = dQ_D/T = -dP_D dE/T,$$

В настоящее время при оценке напряженного состояния поверхностного слоя оперируют уровнем напряжений определенных знаков, сжимающих или растягивающих во всем эффективном объеме взаимодействия, которые уравновешиваются в сечении контактирующих тел.

В случае кинетического нанополя величина локальных напряжений может быть представлена эффектом кавитации жидкости, когда одновременно существуют микрообласти с высоким и низким давлением, итоговая величина напряжения нестационарная. Если реализовать данные условия в ТС, то суммарное изменение температуры и силы трения при изменении нагрузки в контактной области также будут близки к нулю.

Таким образом, выдвинутая в работе [6] гипотеза квазиупругого взаимодействия поверхностей сопровождаемым эффектами минус-трения содержат в себе перспективы в развитии, как в теории, так, и в решении основного прикладного вопроса минимизации трения и износа широкого круга ТС машин и механизмов.

Существование эффектов трения и антитрения, диссипации и антидиссипации заставляет поновому взглянуть на проблему необратимости процессов в ТС, и на этой основе развивать фундаментальный подход к трению и износу. Использование этих эффектов, исходя из работы [6] даст возможность, играя на взаимном влиянии различных степеней свободы, не только уничтожать кинетическое и механическое трение, но и получать выигрыш в кинетической и механической работе за счет различных видов работ. Саморегулирование для такого рода ТС осуществляется по каналу избыточного производства энтропии [16]. Изменение прироста производства избыточной энтропии  $(\delta^2 S)_{TC}$  во времени для неравновесных процессов

описанных выше носит колебательный характер. Т.е. знак будет определять соотношение процессов диссипации и антидиссипации. И фундаментальной величиной, которая определяет устойчивость ТС в условиях неравновесной самоорганизации, является

производство избыточной энтропии.

Подводя итог механизмов диссипации внешней подводимой энергии в ТС можно схематично оценить их эффективность при различных методических решениях, рис. 1.

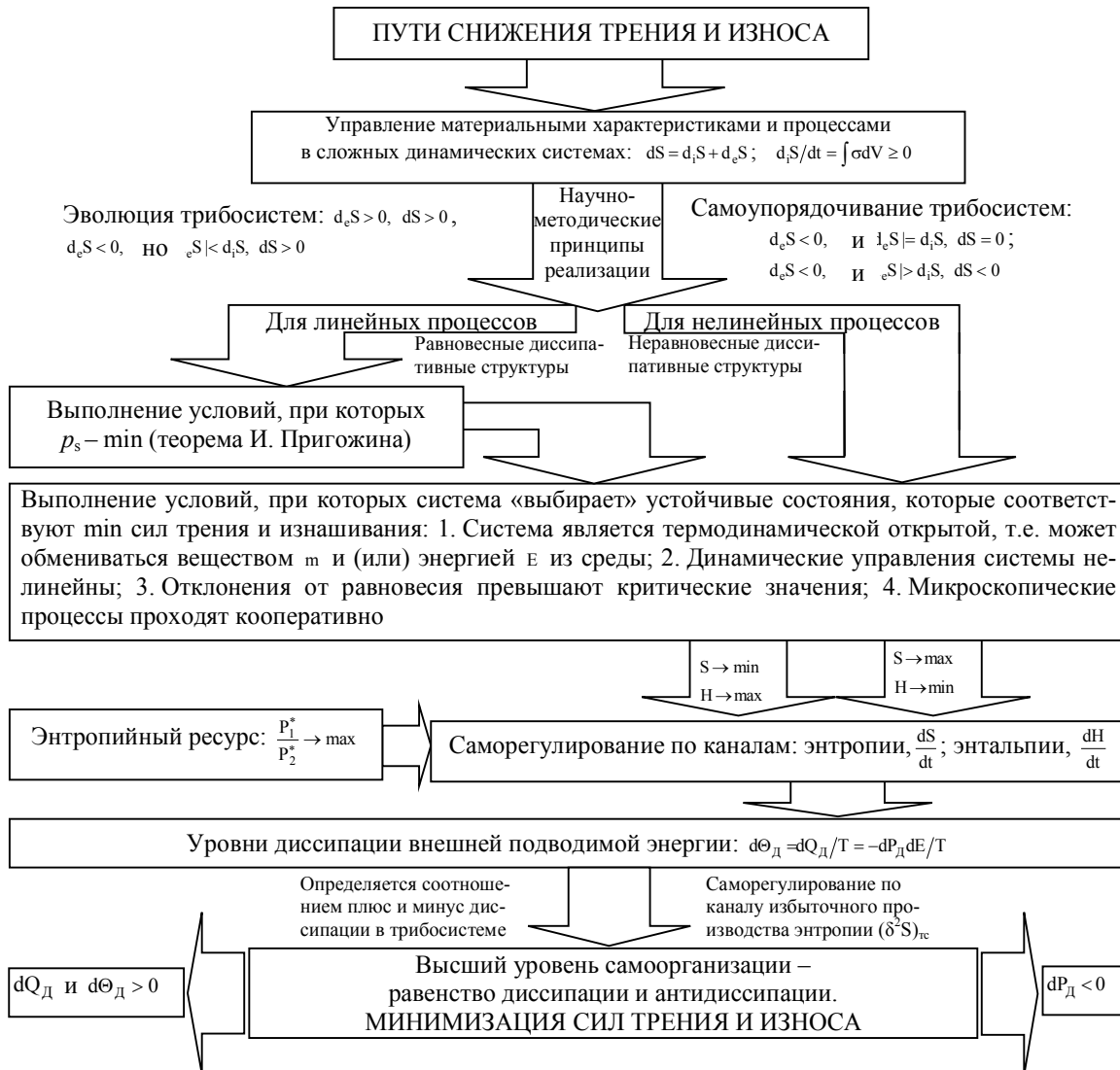


Рис. 1. Выработка методических решений для управления процессами трения и износа

Весьма важным для анализа процессов самоорганизации ТС являются не только кинетические взаимодействия, возникающие на субмикроскопическом, и более тонком уровне, но и поведение поверхностного слоя после остановки ТС. Из работы [17] следует, что остановка ТС приводит к исключению дезорганизации граничного слоя, а процессы, направленные на самоорганизацию еще некоторое время продолжают действовать, что приводит еще большему упорядочению фрикционного контакта и, как следствие – уменьшение силы трения при повторном нагружении. Это обстоятельство позволяет существенно изменить методологию программного нагружения [18], для перевода ТС на более высокий уровень самоорганизации при выводе ее за границы

устойчивости. Программное нагружение предусматривает выдержку полного соответствия между ростом прикладываемой нагрузки и скоростью релаксации внутренних напряжений за счет протекания диффузионных и микросдвиговых процессов. После программного нагружения поверхности ТС становятся более однородными по характеру распределения напряжений. Структура программно-прочностных материалов является механически более равновесной, чем исходный материал, и имеет повышенное сопротивление началу пластической деформации и одновременно меньшей склонностью к хрупкому разрушению [18].

В то же время, импульсное нагружение прикладываемое к ТС, которая находится в данном

структурном состояни, приводит к спонтанному переходу различных уровней перемещения пластических деформаций субструктурного микроуровня на мезоуровень, который существенно превышает глубину наклепанного слоя, при этом наблюдается скачкообразное изменение свойств материалов ТС, то есть переход подобных фазовых превращений. В этом случае поведение материалов на внешние механические воздействия принято рассматривать как среднее между кристаллическим и жидкостным. На поверхности образуется квазиупругий слой в центральной ее части гипотетически возможна гидродинамическая деформация, а на периферии в переходной зоне следует ожидать интенсивную ротационную упругопластическую деформацию, аналогичную структуре вихреобразования в пристеночном слое при течении жидкости [19].

Использование уравнений механики жидкости [19] для описания особенностей ротационной (турбулентной) структуры в металлических материалах, а также интенсивности внешнего импульсного воздействия перспективно из-за близости физической картины и масштабов диссипации энергии в пристеночном слое жидкости и в объемах твердых материалов, где проходит диссипация энергии микроударной нагрузки путем ротаций.

Анализ механизмов диссипации энергии, подводящий к ТС, позволяет сформулировать пути достижения высшего уровня самоорганизации в ТС путем программного нагружения, рис. 2.

Таким образом, возможна экспериментальная проверка гипотезы существования квазибезызносного трения путем достижения равновесия диссипации и антидиссипации действующих напряжений в кинетическом нанополе, что возникает в поверхностном слое при достижении определенных условий, которые рассмотрены выше. При изменении внешних условий, такая ТС должна поддерживать максимальный уровень надежности (минимизация трения и износа) за счет отрицательной обратной связи, поддерживая постоянные параметры кинетического нанополя. Саморегулирование в этом случае происходит по каналу избыточного производства энтропии, рис. 1.

Предварительные экспериментальные исследования, проведенные на стандартной машине трения 2070 СМТ-1 на плоских парах из хромоникелевых сталей трения дали положительные результаты. Для того чтобы результаты имели устойчивую повторяемость возникла необходимость создания автоматизированной системы трибодиагностики (АСТ), что позволит реализовать данную программу нагружения, а так же более детально изучить структуры по глубине поверхностного слоя, и в дальнейшем на основе чего разработать физико-математическую модель квазибезызносного антифрикционного трения.

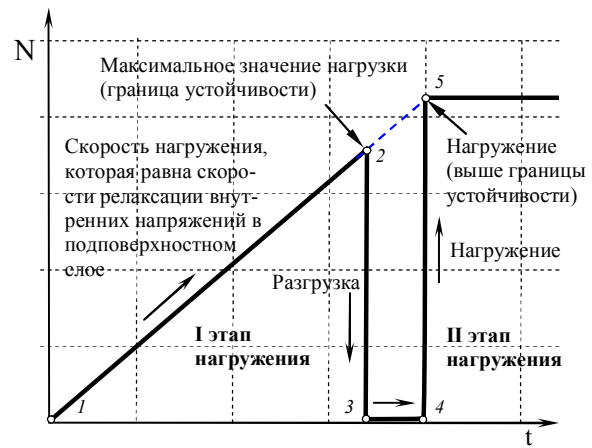


Рис. 2. Программное нагружение при переводе ТС на высший уровень неравновесной самоорганизации: 1 – начало нагружения; 2 – граница устойчивости по переходу к повреждению; 3, 4 – достижение максимального однородного распределения напряжений в поверхностном слое; 4 – импульсное нагружение; 5 – точка бифуркации перевода ТС на высший уровень самоорганизации

Разработанная АСТ позволяет измерять основные параметры испытуемых ТС в реальном масштабе времени. Износ измеряется как традиционными методами после проведения испытания (весовой износ, метод искусственных баз), так и в реальном масштабе времени, методом АЭ, аналогово-цифровым преобразованием линейного перемещения элементов ТС при их износе. Структура параметрической регистрации и управления режимами трения ТС представлена на рис. 3. Структурная схема и внешний вид АСТ представлены на рис. 4, 5.



Рис. 3. Структура параметрической регистрации и управления режимами трения ТС

Для организации обратной связи в процессе регуляции параметров, которые характеризуют работу ТС, необходимо проводить измерения текущих значений скорости скольжения (качения), величины нагрузки, прилагаемой к ТС, температуры в зоне контакта элементов ТС.

Для организации обратной связи в процессе регуляции параметров, которые характеризуют работу ТС, необходимо проводить измерения текущих значений скорости скольжения (качения), величины нагрузки, прилагаемой к ТС, температуры в зоне контакта элементов ТС.

Функциональные возможности АСТ с оптимизацией параметров включает ряд преобразователей и блоков, которые формируют измерительные, регулирующие каналы, а также рабочее место оператора комплекса.



Рис. 4. Структурная схема АСТ: 1 – канал измерения усредненной мощности АЭ; 2 – канал измерения момента трения, температур контакта, износа; 3 – регулятор скорости вращения электропривода; 4 – блок обработки и регистрации; 5 – регулятор уровня нагрузки; 6, 7 – каналы регуляции температуры

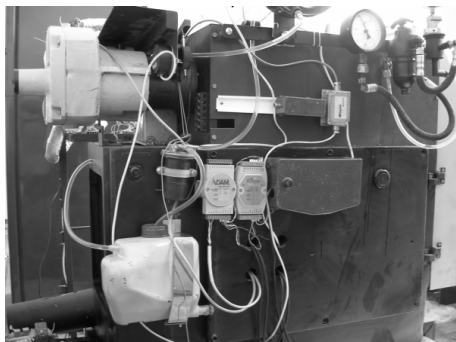


Рис. 5. Внешний вид АСТ

Каждое из устройств, которые входят в измерительный канал, можно рассматривать как независимый модуль, который выполняет определенные функции. В разработанной АСТ каналы 1, 2 осуществляют измерение параметров, которые характеризуют процесс изнашивания ТС. Условия работы ТС определяются скоростью вращения элементов ТС, которая поддерживается регулятором 3 электропривода АСТ и величины загрузки, регулятором нагрузки 5. Температурный режим трения поддерживается регуляторами температуры 6, 7. Блок управления обработки и регистрации 4 задает параметры испытаний регуляторам 3, 5, 6, 7, выполняет сбор информации из каналов 1, 2, ее обработку и регистрацию. Данные измерений и параметров испытаний регистрируются в визуальной форме, на электронных носителях. Блок построен на основе персонального компьютера со специальным программным обеспечением и сред-

ствами взаимодействия с элементами системы автоматизации.

Для подтверждения существования квазиупругого взаимодействия в ТС при программном нагружении проведен сравнительный анализ микротвердости по глубине поверхностного слоя. При трении на максимальных эксплуатационных нагрузках (1600 Н), при обычном нагружении ступенями по 400 Н с выдержкой 2 мин на каждой ступени, и при программном нагружении рис. 2.

Исследования проводились на микротвердомере ПМТ-3 индентером Викерса при нагрузке 25 гр. Измерения размеров отпечатков проводили на микроскопе NU-2E (Carl Zeiss, Jena) при увеличении 750 крат в режиме фазового контраста. Первая точка измерения на поверхности образца, остальные – в поперечном сечении. Результаты исследования показали существенную разницу в изменении микротвердости по глубине поверхностного слоя. При программном нагружении глубина упроченного слоя увеличивается более чем на порядок по сравнению с обычным нагружением. Максимальное значение микротвердости на поверхности образцов при этом достигает 7,5 ГПа, а при обычном нагружении эта величина соответствует 4,2 ГПа. Градиент изменения твердости также существенным образом отличается, хотя эксплуатационные режимы работы ТС в обоих случаях идентичны.

## Выводы

Приоритет данного рода исследования основан на необходимости выработки методических решений для управления процессами трения и износа в условиях неравновесной самоорганизации. Проведенный анализ термодинамических условий неравновесной самоорганизации в ТС при различных механизмах диссипации внешне подводимой энергии позволяет сделать следующие выводы:

1. Наиболее перспективными направлениями теоретических исследований для кардинального снижения трения и износа следует искать в изучении природы самоорганизации неравновесных процессов возникающих при управлении тепловыми потоками в ТС, и при управлении кинетическими взаимодействиями тонкой структуры поверхностного слоя.

2. Важным этапом практической реализации исследований неравновесной самоорганизации в ТС является глубокое всестороннее исследование неравновесных структур поверхностных слоев, которые могут быть использованы в качестве рекомендаций при создании тонкопленочных антифрикционных износостойких покрытий на поверхностях трения, получаемых в рамках различных технологий их нанесения.



3. Поставленные выше задачи требуют принципиально нового подхода экспериментальных исследований, как по каналам измерения параметров ТС, так и по каналам обратных связей их регулирования.

4. Разработанная АСТ, работает на жестких аппаратных алгоритмах с максимальным использованием программных средств для управления процессами измерений, обработки данных и представления результатов анализа информативных параметров ТС. Данная система позволяет наращивать число каналов регистрируемой информации, оперативно изменять алгоритмы управления, алгоритмы обработки данных без изменения внутренней конфигурации электронных средств измерения и управления основными триботехническими параметрами, и позволяет решать следующие задачи: проводить испытания конструкционных материалов на трение и износ; проводить сравнительные испытания износостойких покрытий; проводить сравнительные испытания смазочных материалов на трение и износ; производить оценку эффективности различных присадок и добавок к смазочным материалам; оптимизировать ТС по конструктивным особенностям с учетом масштабного фактора.

### Список литературы

1. Николис Г. Познание сложного. Введение: Пер. с англ. [Текст] / Г. Николис, И. Пригожин – М.: Мир, 1990. – 345 с.
2. Пригожин И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой / И. Пригожин, И. Стенгерс – М.: Прогресс, 1986. – 432 с.
3. Арнольд В.И. Теория катастроф. [Текст] / В.И. Арнольд. – М.: Наука, 2000. – 128 с.
4. Хакен Г. Синергетика: иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах: Пер. с англ. / Г. Хакен – М.: Мир, 1985. – 423 с.
5. Бершадский Л.И. О самоорганизации и концепциях износостойкости трибосистем / Л.И. Бершадский // Трение и износ. – 1992. – Т. 13. – №6. – С. 1077-1094.
6. Вейник А.И. Термодинамическая пара. / А.И. Вейник – Мн.: Наука и техника, 1973. – 383 с.
7. Шлихтинг И.И. Теория пограничного слоя. / И.И. Шлихтинг – М.: Наука, 1974. – 712 с.
8. Запорожець В.В. О механизмах подвижности металлокерамического слоя в технологиях триботехнического восстановления деталей / В.В. Запорожец, О.Н. Трошин, В.Н. Стадниченко и др. // Військово-технічний збірник. – 2010. – № 3. – С. 101-106.
9. Волькенштейн М.В. Энтропия и информация. / М.В. Волькенштейн – М.: Наука, 1986. – 192 с.
10. Малинецкий Г.Г. Хаос. Структуры. Вычислительный эксперимент. / Г.Г. Малинецкий – М.: Наука, 2002. – 256 с.
11. Стадниченко В.Н. Синергетическая концепция самоорганизации в трибологических системах при управлении тепловыми потоками [Текст] / О.Н. Трошин, В.Н. Стадниченко // Вестник: сб. науч. тр. – X: Национальный техн. ун-т «ХПИ», 2007. – Вып. 17: Технологии в машиностроении. – С. 49-62.
12. Машков Ю.К. Структурно-энергетическая самоорганизация в процессах синтеза трения композитов на основе политетрафторэтилена / Ю.К. Машков, О.А. Мамаев, В.И. Суриков // Трение и износ. – 2002. – Т. 23. – №6. – С. 661-666.
13. Протасов Б.В. Энергетические соотношения в трибосопряжении и прогнозирование его долговечности. / Б.В. Протасов. – Саратов: Изд. Саратов. ун-та, 1979. – 152 с.
14. 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.
15. Васильев А.С. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / Васильев А.С. и др. – М.: Машиностроение, 2005. – 384 с.
16. Стадниченко В.Н. Классификация видов износа по значению коэффициента диссипации подводимой внешней энергии к трибосистеме / О.Н. Трошин, В.Н. Стадниченко, Н.Г. Стадниченко и др. // Збірник наукових праць ХУПС. – 2010. – № 1 (27) – С. 51-61.
17. Баранов А.В. Самоорганизация трибосистем при граничном трении металлов / А.В. Баранов и др. // Ползуновский вестник. – 2009. – № 1-2. – С. 155-158.
18. Гиндин И.А. Физика программного упрочнения. / И.А. Гиндин, И.М. Неклюдов – К.: Наук. думка, 1979. – 184 с.
19. Погодаев Л.И. Структурно-энергетические модели поведения (надежности) материалов при импульсном нагружении [Электрон. ресурс] / Л.И. Погодаев и др. // Трение, износ, смазка. – 2013. – Том 15, № 57. <http://www.tribo.ru/>

Поступила в редколлегию 23.01.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, ст. научн. сотр. В.В. Логинов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ НЕРІВНОВАЖНОЇ САМООРГАНІЗАЦІЇ ТРІБОСИСТЕМ

О.М. Трошин, В.М. Стадніченко, М.Г. Стадніченко, Р.А. Жуков, С.В. Красницький

У статті обґрунтовано методичні рішення для управління процесами тертя та зношування шляхом реалізації різних механізмів дисипації зовнішньої підведеної енергії в трибосистемах в умовах не рівноважної самоорганізації

**Ключові слова:** трибосистема, ентропія, знос, автоматизована система трибодіагностики.

### METHODICAL ASPECTS ARE NO EQUILIBRIUM OF INDEPENDENT ORGANIZATION OF TRIBOSYSTEMS

O.N. Troshin, V.N. Stadnichenko, N.G. Stadnichenko, R.A. Zhukov, S.V. Krasnitskiy

In the article the methodical decisions are grounded for the process control of friction and wear by realization of different machineries of dissipation of the external energy tricked into in tribosystems in terms no equilibrium of independent organization

**Keywords:** tribosystem, entropy, wear, automated system of tribodiagnostic.