

УДК 691.891

В.Н. Стадниченко¹, О.Н. Трошин², Н.Г. Стадниченко², А.В. Приймак², И.И. Просяник²¹Национальный авиационный университет, Киев²Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков**КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ НАНОИЗНОСА ПО ЗНАЧЕНИЮ КОЭФФИЦИЕНТА ДИССИПАЦИИ ПОДВОДИМОЙ ВНЕШНЕЙ ЭНЕРГИИ К ТРИБОСИСТЕМЕ**

В статье рассмотрено методология применения метода акустической эмиссии (АЭ) при решении задач диагностики и прогнозирования ресурса трибосистем, работающих в режимах наноизнашивания. Разработан критерий оценки видов наноизнашивания. Проведен сравнительный анализ уровня различных видов наноизнашивания и их классификация в условиях равновесной и неравновесной самоорганизации трибосистем.

Ключевые слова: трибосистема, нанотехнологии, акустическая эмиссия, износ, классификация видов наноизнашивания, диссипация подводимой внешней энергии, прогнозирование.

Введение

Постановка проблемы. Современное развитие нанотехнологий позволили получать на поверхностях трения покрытия, имеющие на несколько порядков выше износостойкость по сравнению с широко распространенными конструкционными материалами. Традиционные методы измерения скорости изнашивания трибо систем, работающих в режиме наноизнашивания требуют проведения длительных испытаний, время которых может находиться в пределах от 10 до 100 часов. Поэтому актуальным является разработка ускоренных методов оценки скорости изнашивания таких трибосистем, с помощью которых представляется возможным их классификация.

Анализ последних достижений и публикаций. В качестве критерия износостойкости материалов при трении в работе [1] предлагалось использовать удельную работу изнашивания $A_{из}$, которая представляет собой отношение работы A , что затрачивается на отделение некоторой части материала в трибосистеме к весу этой части ΔI .

$$A_{из} = A / \Delta I \quad (1)$$

Использование энергетического подхода к процессам трения и изнашивания позволило использовать данный критерий для классификации различных видов износа и повреждаемости (табл. 1).

По величине данного критерия, возможно, проводить сравнительный анализ износостойкости разных трибосистем. Однако основным его недостатком является необходимость проведения долговременных испытаний на трение и износ, которые, как известно, имеют высокую стоимость. Дальнейшее развитие подхода к критериальной оценке износостойкости предложено в работе [2]. В качестве критерия износостойкости в этом случае выступает критическая плотность потока энергии деформации, которая отвечает предельному насыщению внутренней энергией продуктов изнашивания материалов и состоит из упругой и пластической составляющих.

Таблица 1

Классификация видов износа по параметру удельной работы износа $A_{из}$

Вид износа или повреждаемости	Удельная работа износа или повреждаемости, $A_{из}$, Дж/мм ³
Нормальный механохимический износ	100000...100000000
Механохимическая форма абразивного износа	100000...1000000
Фреттинг-процесс	10000...100000
Схватывание II рода	1000...10000
Схватывания I рода	100...1000
Механическая форма абразивной повреждаемости	10...100

С учетом влияния на среднюю скорость изнашивания материалов трибосистем \mathcal{G}^* (* – знак осреднения), разных масштабных уровней нагрузки, исходное энергетическое соотношение представлено авторами работы [2] в виде уравнения:

$$\mathcal{G}^* = \text{const} \left(\omega_{вн} / \omega_{кр}^* \right)^{n/3} \quad (2)$$

где $\omega_{вн}$ – плотность потока внешней энергии; $\omega_{кр}^*$ – усредненная критическая плотность потока энергии деформации, что распространяется в материалах в виде упругих и пластических деформаций; n – параметр, который дискретно изменяется в зависимости от масштабных уровней изнашивания по правилу, близкому правилу геометрической прогрессии, в соответствии с изменением энергии активации основных процессов структурных превращений в деформированных объемах материала. При увеличении масштабов от микро к макроуровню показатель степени n изменяется от одного до восьми порядков.

Критическая плотность потока энергии деформации $\omega_{кр}^*$ представлена как:

$$\omega_{кр}^* = \frac{E_{упр} V_{кр}^{упр} + E_{пл}^* V_{кр}^{пл}}{3}, \quad (3)$$

где $E_{упр}$ и $E_{пл}^*$ – предельная энергоёмкость материалов при изнашивании в упругой и упругопластических областях; $V_{кр}^{упр}$, $V_{кр}^{пл}$ – критические скорости изнашивания в упругой и упругопластических областях.

Таким образом, данный подход и критерии отображают многомасштабность поверхностного разрушения, и дает возможность сравнительных оценок. Однако для определения параметра n также нужны значительные по объемам испытания. Оба подхода могут быть теоретической базой для разработки расчетных методов при сравнительной оценке износостойкости трибосистем применение же их для оценки наноизноса невозможно по ряду показателей. В первую очередь в данных подходах неопределенными оказываются величина удельной работы разрушения, если она не привязывается к значениям максимальных эксплуатационных нагрузок, которые, как правило, оцениваются параметром PV . При низких показателях этого параметра сравнительный анализ трибосистем работающих в режиме наноизнашивания не возможен.

Целью данной работы является использование метода АЭ для разработки критерия позволяющего проводить прогнозирование скорости изнашивания трибосистем работающих в условиях наноизнашивания и проводить их классификацию.

Изложение материалов исследований

В качестве метода регистрации наноизноса в работах [3-6] предложено использовать метод АЭ.

Наноизнос в работе [7] классифицируется как износ, который не может быть зарегистрирован традиционными методами регистрации (весовой, линейный) за время 8...10 часов испытаний на машине трения при максимальных эксплуатационных нагрузках для трибосистем определенного функционального назначения, в частности для трибосистем в агрегостроении эта величина находится в пределах 1400...1600 Н, а с учетом коэффициента взаимного перекрытия (плоскость-плоскость) внешняя удельная энергетическая нагрузка $PV=3,785 \text{ Вт/мм}^2$. Разработанная методология регистрации скорости изнашивания основана на взаимосвязи усредненной мощности АЭ и скорости изнашивания трибосистемы, которая может быть измерена как в единицах мощности, так и величиной информации об износе [3], (Рис. 1).

Результаты математического моделирования при оценке скорости изнашивания методом АЭ в трибосистемах позволили провести оценку чувствительности метода АЭ при регистрации износа в анализируемых трибосопрежениях. Она находится в пределах диапазона изменения удельной эмиссионной активности $\xi_{АЭ}=1,2 \times 10^{-11} \dots 1,45 \times 10^{-11} \text{ г/байт}$. При возрастании прочности материалов (рис. 1)

удельная эмиссионная активность также возрастает. При этом погрешность прогнозирования обеспечивается на уровне не более 2...2,5% при условии нормального механохимического износа. В условиях перехода к повреждаемости погрешности резко возрастают и применение метода АЭ в этом случае ограничивается диагностическими признаками (рис. 2).

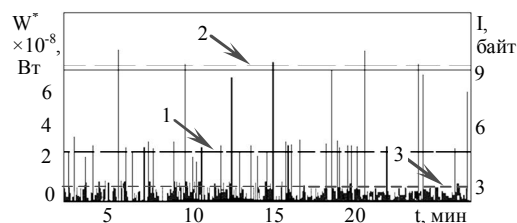


Рис. 1. Диаграмма изменения усредненной мощности сигналов АЭ $W_{ус}$ по времени: 1 – средний уровень при отделении частиц износа стали Сталь 40; 2 – средний уровень при отделении частиц износа БрАЖ 9-4; 3 – средний уровень от микродефектов и пластической деформации поверхностных слоев

В случае приближения к границам наноизноса и допустимого износа точность прогнозирования незначительно снижается. При работе в соответствующих областях предложенная методика прогнозирования весового износа по энергетическим параметрам АЭ обеспечивает точность прогноза на уровне 4...5%.

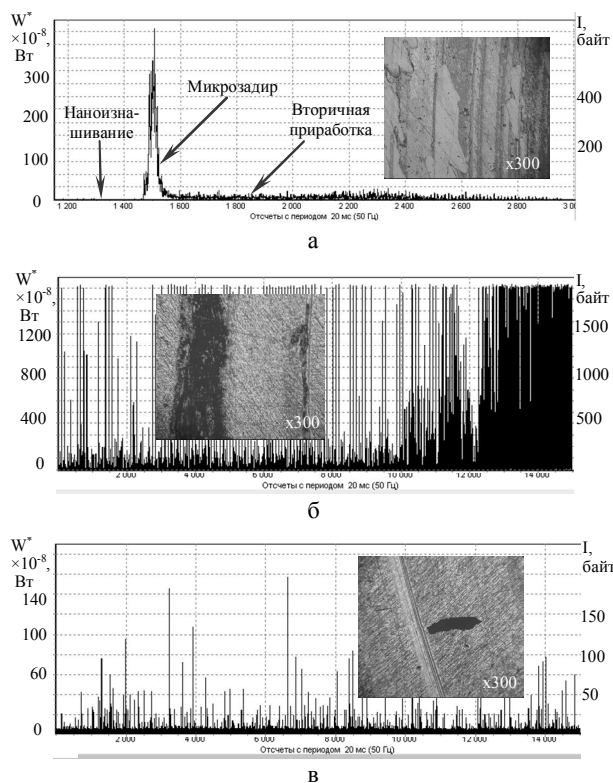


Рис. 2. Диаграмма изменения скорости изнашивания в единицах измерения мощности АЭ при наличии микроповреждаемости: а – микрозадири; б – переход к задиру; в – питтинговое разрушение (глубина питтинговых язв составляет 0,05...0,052 мм)

Разработанная методика обработки акустико-эмиссионного излучения и определения скорости изнашивания, позволяет регистрировать скорость изнашивания, начиная с отделения первой частицы износа в трибосистеме в единицах измерения мощности АЭ. Методика дает возможность определить общие закономерности механизмов изнашивания разных трибосистем, разработать критерии оценки их технического состояния, и прогнозирования ресурса машин и механизмов. Таким образом, метод АЭ можно отнести к нанотехнологиям в измерении изнашивания. И этот метод может быть использован как для оценки, так и для классификации наноизнашивания.

Современные методы контроля процессов изнашивания с использованием метода АЭ делает возможным сопоставлять энергетические параметры АЭ с мощностью, которая подводится к трибосистеме в процессе ее работы.

Величина, которая характеризует подведенную мощность W_L на единицу площади S контактного взаимодействия, представлена выражением:

$$\frac{W_L}{S} = P \frac{dI_h}{dt}, \quad (4)$$

где W_L/S – удельная мощность изнашивания; P – приложенная нормальная нагрузка в трибосистеме [H/m^2]; I_h – скорость изнашивания.

В условиях равновесного самоупорядочивания W_L удовлетворяет принципу наименьшего действия (минимального производства энтропии) тогда

$$\int_{t_1}^{t_2} W_L dt \rightarrow \min, \quad (5)$$

где $\Delta t = t_2 - t_1$ – интервал времени усреднения.

Условие минимума задается уравнением Лагранжа:

$$\frac{d(\partial W_L / \partial I_h)}{dt} - \frac{\partial W_L}{\partial I_h} = 0. \quad (6)$$

Данное уравнение справедливо при условии:

$$\frac{d(\partial W_L / \partial I_h)}{dt} = 0. \quad (7)$$

Откуда

$$\frac{\partial W_L}{\partial I_h} = \text{const} \quad (8)$$

или

$$\frac{2I_h}{kV} = \text{const}, \quad (9)$$

где $k = \mu^*$ – безразмерный коэффициент изнашивания, который учитывает физико-механические свойства материалов, условия трения и смазки, который

может быть рассчитан как усредненное значение коэффициента трения за время испытания, что и дискретизация измерения мощности АЭ [8]; V – скорость скольжения. Таким образом

$$I_h = \text{const} \frac{\mu^* V}{2}, \quad (10)$$

что дает возможность записать (10) в виде:

$$I_h = C, \quad (11)$$

где C – постоянная.

Таким образом, на стационарном режиме изнашивания, удельная мощность изнашивания W_L это есть произведение квадрата скорости изнашивания I_h^2 к коэффициенту пропорциональности μ :

$$W_L = \mu^* I_h^2. \quad (12)$$

Вернемся к информативному параметру АЭ – усредненной мощности АЭ с единицы площади контактного взаимодействия W^* .

$$W^* = I_h / \xi_{AЭ}, \quad (13)$$

где $\xi_{AЭ}$ – удельная эмиссионная активность – величина изнашивания трибосопряжения за интервал времени усреднения W^* . Физическая сущность представляет собой мощность АЭ, которая регистрируется при отделении единицы массы трибоэлемента.

Приведем скорость изнашивания в выражениях (12) и (13) к одному пути трения:

$$\begin{cases} I_h^* = \sqrt{W_L^* / \mu^*}; \\ I_h^* = \xi_{AЭ} W^*. \end{cases} \quad (14)$$

Таким образом:

$$I_h^* = \frac{W_L^*}{W^* \mu^*} \cdot \frac{1}{\xi_{AЭ}}. \quad (15)$$

Обозначим обратную величину первого множителя $\xi^{**} = \frac{W^* \mu^*}{W_L^*}$ – коэффициент диссипации

внешней подводимой энергии к трибосистеме выраженный в процентах оценивает долю подводимой мощности, к трибосистеме, которая преобразуется в процессы разрушения поверхностных слоев. С учетом высокой чувствительности метода АЭ к процессам поверхностного разрушения, эта величина может быть параметром оценки видов наноизнашивания.

Подведенная энергия к трибосистеме определяется конструкционными материалами, смазочными средами, используемыми соответствующих областях машиностроения и оценивается внешней удельной энергетической нагрузкой. Мощность подводится в трибосистему через триботехнический показатель μ^* , большая ее часть преобразуется в тепло (более 90%), а остальная часть в процессы

пластической деформации, разрушение и сопутствующее ему виды энергий – акустическую, электромагнитную и т.д. [1].

Разработанная методология измерения скорости изнашивания трибосистемы в единицах измерения мощности [3] позволила разделить сигналы АЭ при нормальном изнашивании и повреждаемости в зависимости от их энергоёмкости (рис. 1, табл. 2).

Наноизнашивание также как нормальный механохимическое изнашивания по классификации Б.И. Костецкого обусловлен разрушением поверхностных слоев по механизму хрупкого разрушения (вторичные структуры II рода), и пластического отеснения (вторичные структуры I рода). Энергоёмкости сигналов АЭ при разрушении вторичных структур различного типа различаются и выше для вторичных структур II рода, что наглядно видно из выражений, полученных в работе [9].

Таблица 2

Энергоёмкость сигналов АЭ для различных механизмов накопления повреждений в трибосистемах, работающих в режиме наноизнашивания

№ п/п	Механизмы повреждений (изнашивания)	Энергоёмкость в единицах измерения мощности	
		Байт	Вт×10 ⁻⁸
1.	Процессы пластической деформации и образования микротрещин в поверхностном слое	0...3	0...3,75
2.	Отделение единичных частиц износа	3...10	3,75...12,5
3.	Участок стационарного изнашивания (после приработки)	10...25	12,5...31,25
4.	Сопутствующие механизмы микроповреждаемости (микрораздир)	300...600	375...750

Мощность сигнала АЭ при разрушении вторичных структур I типа:

$$W_I = (U_0^*)^2 \varepsilon_0^2 k \exp(-2b\varepsilon_0), \quad (16)$$

где U_0^* – амплитудное смещение, которое зависит от физико-механических свойств материала; ε_0 – относительная деформация; b – постоянная материала.

Мощность сигнала АЭ при разрушении вторичных структур II типа:

$$W_{II} = U_0^2 \delta_{\text{инт}}^2 \frac{\exp(-2b\sigma_{0\text{эКВ}})(2b\sigma_{0\text{эКВ}} + 1)}{b\sigma_{0\text{эКВ}}}, \quad (17)$$

где U_0 – максимально возможный сдвиг во время разрушения; $\delta_{\text{инт}}$ – численное значение интеграла в отдельных актах хрупкого разрушения; $\sigma_{0\text{эКВ}}$ – начальное эквивалентное напряжение.

Проведение сравнительных испытаний на трение и изнашивание в условиях $W_L = \text{const}$ делает возможным по значению усредненной мощности АЭ W^* измеренной по завершению приработки сделать вывод об увеличении или уменьшении износостойкости трибосистем, относительно эталона, и позволяет значительно сократить время испытаний на изнашивание при разработке новых конструкционных и смазочных материалов [5]. Особо значимые результаты использования метода АЭ получены при исследовании износостойкости неравновесных диссипативных структур. Для вывода трибосистем за границы устойчивости использовалась следующая методика. Проводили испытание на трение и износ при качении с 20% проскальзыванием трибоэлементов выполненных из хромоникелевых сталей (12Х2Н4А) на максимальных эксплуатационных нагрузках – 1600 Н; скорость скольжения – 0,5 м/с; смазочная среда БЗВ. Смазка осуществлялась окуномением нижнего диска в ванну с маслом. Испытания проводили в специальной камере разделенной диафрагмой по линии контакта. Нижний диск подогревался нагревательным элементом, размещенным в масле, а верхний диск охлаждался продувом холодного воздуха через верхнюю часть камеры (рис. 3). Испытания на износ проводили по следующей программе. Проводили приработку трибосистемы до стабилизации всех параметров. После окончания приработки включали систему автоматического терморегулирования и начинали подогрев масла и охлаждение верхнего диска при поддержании постоянной температуры в контактной области. Подогрев осуществляли до тех пор, пока не происходил переход трибосистемы от стационарного уровня скорости изнашивания достигнутого после приработки к наноизнашиванию. Процесс регистрировался методом АЭ. Сигналы АЭ принимались датчиком, размещенным в волноводе через масляный клин. После фазового перехода параметры нагрева и охлаждения в испытательной камере фиксировались. Таким образом, фиксировался тепловой поток через контактную область в трибосистеме. По существу данный опыт повторяет термодинамические условия, которые создавались авторами работы [10] в открытии реакции Белоусова – Жаботинского.

После проведения длительных непрерывных испытаний на износ в течении 100 часов установлено, что при создании теплового потока определенной величины через линию контакта происходит переход трибосистемы из равновесного стационарного состояния к неравновесному состоянию при $W_L = \text{const}$. Неравновесное стационарное состояние характеризуется двумя уровнями износостойкости. Время нахождения трибосистемы на каждом из этих уровней составляет 4...5 часов. На каждом из уровней были проведены комплексные металлофизические исследования (рис. 4).

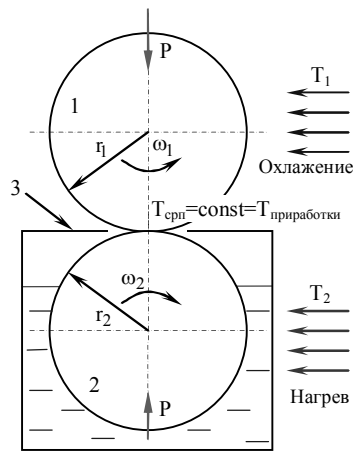


Рис. 3. Принципіальна схема переведення трибосистеми "диск-диск" із умов рівнової самоорганізації до умов нерівнової за рахунок створення теплового потоку через лінію контакту: 1, 2 – трибоземента, 3 – розділююча діафрагма; T_1, T_2 – температура нагріву та охолодження; $T_{срп}$ – середньповерхнева температура в контактній області; ω_1, ω_2 – кутові швидкості для першого та другого трибоземента відповідно; r_1, r_2 – радіуси першого та другого трибоземента відповідно

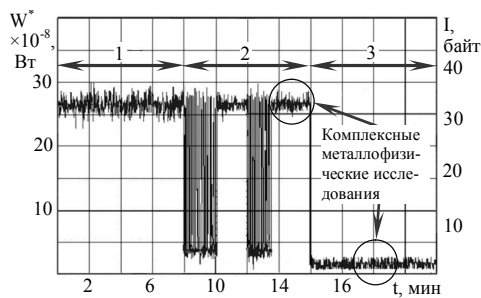


Рис. 4. Діаграма зміни швидкості зношування в одиницях виміру потужності АЕ при переході до режиму нанозношування трибосистеми диск-диск 12Х2Н4А (смазочна середовище БЗВ): 1 – встановившийся режим зношування; 2 – точка біфуркації; 3 – режим нанозношування

Проаналізуємо практичну значимість результатів отриманих після вивчення нерівнової дисипативних структур отриманих за рахунок підведення теплової енергії до першого трибоземента та її відводу шляхом примусового охолодження від другого трибоземента.

На сьогоднішній день існують два підходи до підвищення терміну служби деталей [1]:

- зниження рівня активації за рахунок оптимізації фізико-механічних властивостей вторинних структур виникаючих на поверхні тертя;
- покращення пристосованості матеріалів в трибосистемі.

При першому підході створюються структури, які були б стабільні при можливо більшому зовнішньому впливі. Другим підходом передбачається створення структур, здатних ефективно рас-

сеивати підводиму енергію в момент піка напружень з допомогою перетворень на різних структурних рівнях.

Оскільки матеріал представляє собою відкриту термодинамічну систему, то під впливом зовнішнього впливу в даному випадку теплового потоку в ній можливо виникнення як лінійних, так і нелінійних процесів розсіювання енергії пластичної деформації.

Дислокація в металі має власне поле напружень і є елементарним носієм енергії в системі. Ламінарне, хаотичне рух дислокацій внаслідок взаємодії з зовнішнім полем напружень є лінійним процесом дисипації енергії. Структурно – це зародження, скопчення, перекопчення дислокацій, що призводить до утворення різних дислокаційних побудов.

Нелінійний процес дисипації енергії – це явище самоорганізації шляхом упорядкування потоків енергії в системі. В результаті самоорганізації за рахунок створення додаткового теплового потоку через лінію контакту в трибосистемі відбувається узгоджене, колективне переміщення субмікροструктурних дефектів. Зміна хаотичного руху дислокацій на упорядкований – нерівновесний фазовий перехід. Він обумовлений локальною нестійкістю скопчень дислокацій в ефективному об'ємі взаємодій. Умова його виникнення (точка біфуркації) (рис. 4, поз. 2), пов'язана з появою флуктуацій хімічного і структурного стану обумовленого великими градієнтами напружень. Структурно самоорганізація потоком енергії в цьому випадку виражається в колективному русі дислокацій і побудові дислокаційних стінок субграниць в підповерхневому шарі, де ці напруження максимальні.

Так як субграниця – це місце сопряження розорієнтованих об'ємів, то її утворення геометрично означає поворот решітки. Таким чином, ротація (ротационні моди) – це результат узгоджених, колективних дислокаційних побудов внаслідок самоорганізації потоків енергії в трибосистемі. Механізм ротаційної подвижності, пов'язаний з проскальзуванням утворених ультрадисперсних фрагментів один відносно до іншого [11 – 13], що забезпечує в поверхневих шарах великі пластичні деформації (рис. 5). При цьому розворот фрагментів структури здійснюється навколо осі, перпендикулярно напрямку тертя і паралельно поверхні скопчення, що підтверджено результатами Фур'є-аналізу просторової орієнтації субблоків структури поверхневих шарів в трибосистемі (рис. 6).

Розглянемо зміни структурної організації поверхневих і підповерхневих шарів виникаючих при терті і зносі матеріалів даної трибосистеми при переході до нанозношуванню с

позицій фізической мезомеханики. Проведенные авторами работ [11 – 14] исследования свидетельствуют, что основным механизмом диссипации энергии, которая дополнительно подводится к трибосистеме является фрагментация подповерхностных слоев. Однако этот процесс не бесконечен. Существует некоторый минимальный размер фрагмента, при котором материал выходит за предел пластичности.

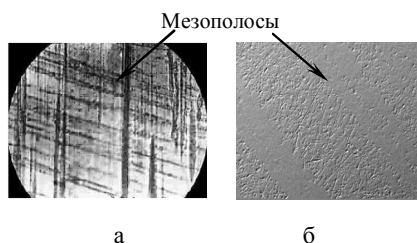


Рис. 5. Фрактография поверхности верхнего диска трибосистемы диск-диск 12Х2Н4А (смазочная среда БЗВ) при переходе трибосистемы к минимальной интенсивности изнашивания: а – х250; б – х5000

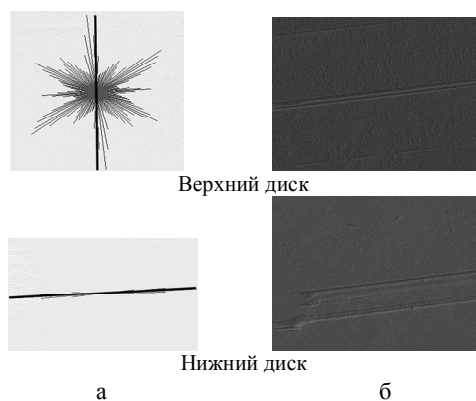


Рис. 6. Фурье анализ пространственной ориентации субблоков структуры поверхностей трения трибосистем при минимальной интенсивности изнашивания: а – направление ориентации субблоков структуры; б – микрофотографии поверхностей трения х1050

Следствием чего может стать появление зародышей микротрещин, рост и объединение которых приводит к образованию магистральных трещин и далее разрушению поверхностного слоя. Однако при определенном напряженном состоянии может произойти объединение данных фрагментов, что приводит к формированию фрагментированной мезоструктуры, обуславливающей блокирование микропластической деформации. В этом случае в упрочненном поверхностном слое (рис. 7) деформация проявляется в возникновении периодически распределенных микротрещин. С ними связано развитие в объеме материала мезополос локализованной пластической деформации по сопряженным направлениям максимальных касательных напряжений. Деформирование образца трением сопровождается пересечением сопряженных мезополос, которые формируют мезоструктуру, состоящих из отдельных перемещающихся по схеме "сдвиг-поворот" мезообъемов.

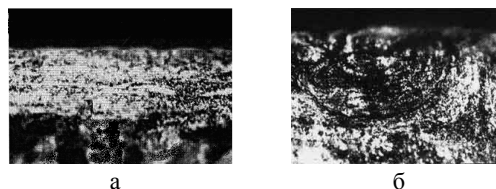


Рис. 7. Фрактографические исследования поверхности трения верхнего образца трибосистемы диск-диск 12Х2Н4А (смазочная среда БЗВ) при переходе в наноизносный режим трения х10000: а – микрошлиф поверхностного слоя при переходе к наноизнашиванию; б – фрагмент ротационной структуры

Поскольку мезофрагменты испытывают сдвиговую и поворотную деформацию в полосе скольжения, становится возможным перемещение объемных структурных элементов различного масштаба относительно друг друга в параллельных плоскостях. По существу происходит образование нанослоев, и материал приобретает слоистую градиентную структуру.

Однако с течением времени разворот крупных фрагментов приводит к их фрагментации и образованию вихревой мезоструктуры имеющей другой масштаб и являющимися зародышами частиц износа (рис. 8), которые регистрировались на поверхности верхнего диска.

Упрочненный поверхностный нанослой блокирует выход и развитие данной структуры на поверхность. Дальнейшая фрагментация данных мезовихрей на меньшие мезообъемы определяет дискретные размеры частиц износа и интенсифицирует процесс изнашивания. Как показали металлофизические исследования, частицы износа в данном случае представляют собой мезофазу подповерхностного слоя. Скорость изнашивания по мере разрыхления поверхностного слоя увеличивается, изменяется градиент напряженного состояния в поверхностном слое и через точку бифуркации трибосистема переходит в первоначальное состояние.

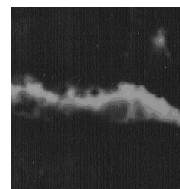


Рис. 8. Фрактография поверхности трения верхнего элемента трибосистемы диск-диск 12Х2Н4А (смазочная среда БЗВ) при переходе наноизносный режим трения с частицей износа х1050

Создавая тепловой поток через контактную область в данном эксперименте создавались условия квазиравновесного термодинамического состояния для нижнего диска и вывод термодинамического состояния верхнего диска далеко за уровень равновесия. Этот методический подход впервые позволил за счет экс-

порта энтропии (тепловой поток через линию контакта) в трибосистему обеспечить переход к новым условиям неустойчивого равновесия. Этим условиям соответствует формирование неравновесных диссипативных структур на поверхности верхнего диска. Исследования химического состава по глубине поверхностного слоя (на косом срезе) позволили установить следующие закономерности: при переходе к наноизнашиванию. В поверхностном слое верхнего диска происходит значительное обогащение хромом и полное удаление никеля с его перемещением на глубину 1,5...2 мкм (область максимальных контактных напряжений). Движущим механизмом самоорганизации в данном случае является обратимая диффузия Конобева – Горского.

Поверхностный слой в результате этих процессов представляет двухслойную оболочку: верхний слой, предельно упрочненный и упругий, нижний слой пластичный, прилегающий к матрице из основного материала. Неравновесная самоорганизация приводит к образованию отрицательного градиента физико-механических свойств по классификации И.В. Крагельского, не типичного для трибосистем, работающих в условиях без управления тепловым потоком. Этот вывод подтверждается исследованиями микротвердости по глубине поверхностного слоя. В нижнем диске, напротив, происходит обогащение поверхностного слоя никелем и обеднение хромом. Поверхностный слой пластифицируется и таким образом в нижнем диске происходит образование положительного градиента физико-механических свойств. Движущими механизмами создания этого градиента являются термодиффузия. И первый и второй диффузионные механизмы можно отнести к "антидиффузии", поскольку перемещение элементов происходит из области меньшей концентрации в область большей концентрации. Именно эти условия и обеспечивают переход трибосистемы в режим наноизнашивания.

Математическое моделирование работы данной трибосистемы с позиции механики твердого деформированного тела позволили объяснить возникающие эффекты [15]. Поскольку величина теплового потока через линию контакта является управляющим фактором при переходе от равновесной к неравновесной самоорганизации, то логично предположить, что этот переход возможен в трибосистемах с трибоэлементами из материалов с большой разницей коэффициентов теплопроводности за счет увеличения нагрузки до некоего критического уровня. Для проверки данной гипотезы проводили экспериментальные исследования трибосистем бронза ВБ23НЦ – сталь 30Х3ВА азотированная твердостью 780HV (прямая трибосистема – бронзовый элемент неподвижен), смазочная среда – авиационный керосин ТС-1. При выходе трибосистемы на уровень нагрузки 1600 Н по изменению усредненной мощности АЭ (рис. 9) и момента трения был

обнаружен структурно-фазовый переход, который сопровождался существенным снижением всех триботехнических показателей. Нагрузку увеличивали ступенчато с величиной ступени 200 Н и временем работы на каждой ступени 5 мин.

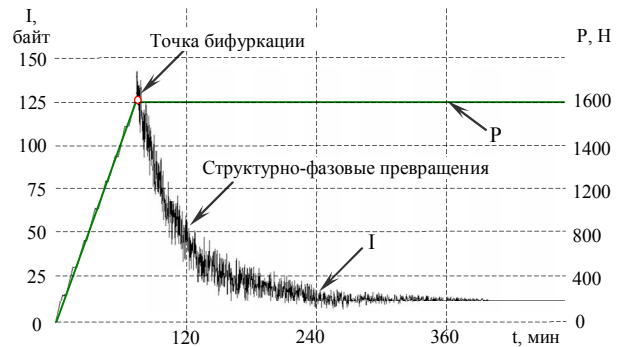


Рис. 9. Динамика изменения скорости изнашивания трибосистемы ВБ23НЦ – 30Х3ВА

Для установления механизма неравновесной самоорганизации в данной трибосистеме, полученной за счет увеличения нагрузки до критического значения, была проведена следующая серия испытаний по три опыта с уровнями нагрузки 1400 Н и 1600 Н, результаты испытаний показаны на рис. 10.

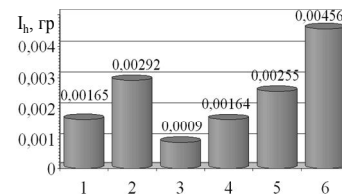


Рис. 10. Весовой износ элементов трибосистемы ВБ23НЦ – 30Х3ВА: 1, 2 – неподвижный трибоэлемент; 3, 4 – подвижный трибоэлемент; 5, 6 – суммарный износ трибоэлементов

В результате проведенных комплексных металлофизических исследований поверхностей трения данной трибосистемы после испытаний на уровне нагрузок 1400 Н и 1600 Н, установлен механизм неравновесной самоорганизации, который обусловил переход на новый уровень триботехнических показателей. Результаты химического анализа поверхностных слоев отображены на рис. 11.

Основным изменением по химическому составу и структуре подверглись трибоэлементы из бронзы, поэтому сравнительный анализ проводили, анализируя изменения в этих трибоэлементах.

Фрактографические исследования, проведенные в тех же точках на поверхности трения, представлены на рис. 12.

Результаты химического анализа показали, что переход к неравновесной самоорганизации сопровождается скачкообразным увеличением процентного содержания железа более чем в 12 раз, олова более чем в два раза и снижением процентного содержания титана и меди более чем в два раза. Эти изменения обусловили улучшение триботехнических характеристик данной трибосистемы при нагрузке 1600 Н.

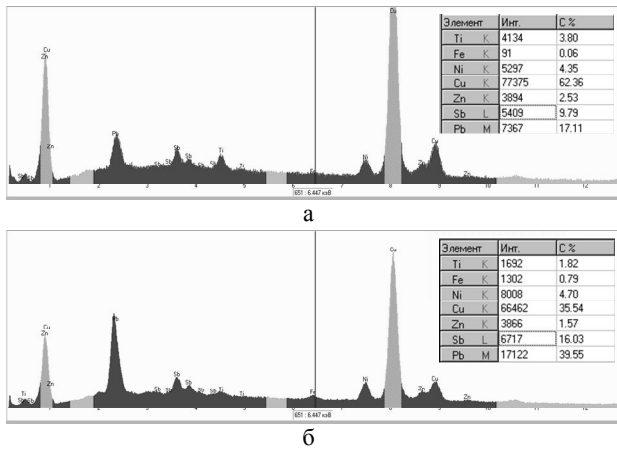


Рис. 11. Результаты исследования химического состава поверхностей трения в средней части дорожки трения: а – нагрузка 1400 Н; б – нагрузка 1600 Н

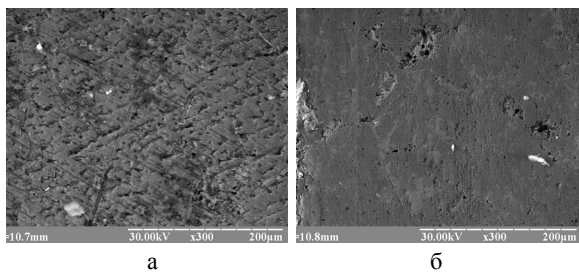


Рис. 12. Фрактографические исследования бронзовых образцов x300: а – нагрузка 1400 Н; б – нагрузка 1600 Н

Движущим механизмом неравновесной самоорганизации данной трибосистемы является избирательная термодиффузия. Также как и в случае обратимой диффузии, определенной группе элементов термодинамически более выгодно находится в поверхностном слое (Pb, Fe), а другой группе (Cu, Ti) в подповерхностном слое с учетом градиента напряжений в поверхностном слое.

Поверхности трения становятся пористыми хорошо удерживающими смазочный материал, внешне на элементах бронзовых образцов проявляется потемнением рабочей поверхности. При разборке топливных насосов, которые поступают в ремонт поверхности имеют характерных золотистый цвет, такой же, как и при нагрузке 1400 Н в исследуемой трибосистеме, это свидетельствует о том, что трибосистемы в реальных узлах работают в условиях, не обеспечивающих всех триботехнических возможностей заложенных в самих материалах.

Совершенствуя конструкцию трибосистем изготовленных из исследуемых материалов повышая внешнюю удельную энергетическую нагрузку PV до критического уровня создаются условия в более чем двукратного повышения ресурса данных трибосистем при общем улучшении триботехнических характеристик (рис. 13).

Фундаментальной величиной, который определяет устойчивости трибосистемы в условиях не-

равновесной самоорганизации является производство, избыточной энтропии $P[\delta S]$ [10]. Следует отметить, что при исследовании неравновесной самоорганизации хромоникелевых сплавов при управлении тепловым потоком имеет место как отрицательный, так и положительный прирост избыточного производства энтропии связанный с флуктуациями напряженно деформированного состояния поверхностного и подповерхностного слоя трибоэлементов вызванного сменой механизма диффузии легирующих элементов в поверхностях контакта трибосистемы. Вследствие этого изменение прироста производства избыточной энтропии $(\delta^2 S)_{тс}$ по времени носит колебательный характер (рис. 14).

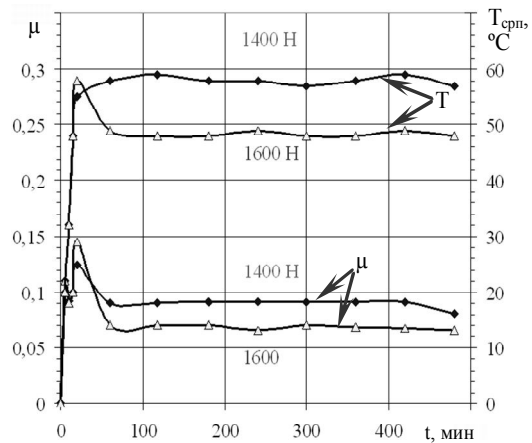


Рис. 13. Диаграмма изменения триботехнических параметров во времени для различных нагрузок

В случае неравновесной самоорганизации трибосистемы сталь-бронза создание на поверхности пористой пленки обогащенного железом и оловом происходит в результате термодиффузии и избыточное производство энтропии для этой трибосистемы $(\delta^2 S)_{тс} \leq 0$. При постоянном подводе энергии изменение $(\delta^2 S)_{тс}$ по времени имеет вид (рис. 15), что обеспечивает устойчивое равновесное состояние. Генератором тепла в данном случае является сама трибосистема при выводе ее на нагрузку выше критической. При равновесной самоорганизации следуя теореме о минимальном производстве энтропии данная величина $(\delta^2 S)_{тс}$ после приработки равна нулю. Это и объясняет кардинальное различие в поведении трибосистем работающих в условиях неравновесной самоорганизации.

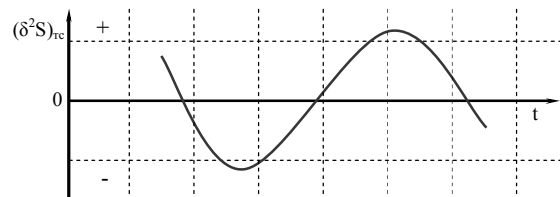


Рис. 14. Изменение прироста производства избыточной энтропии $(\delta^2 S)_{тс}$ по времени испытания в условиях неравновесного самоупорядочивания трибосистемы при управлении тепловым потоком

Результаты проведенных исследований неравновесных диссипативных структур образующихся при управлении тепловым потоком позволили сформулировать рекомендации к созданию многослойных ионноплазменных покрытий для кардинального повышения износостойкости высоконагруженных трибосистем применяемых в агрегатостоении.

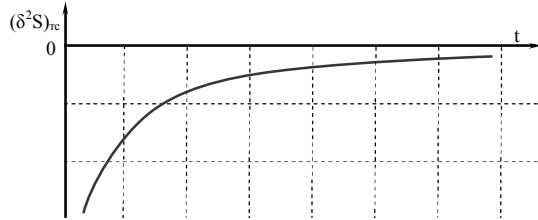


Рис. 15. Изменение прироста производства избыточной энтропии $(\delta^2 S)_{тс}$ по времени, в условиях неравновесного самоупорядочивания трибосистемы ВБ23НЦ – 30Х3ВА (смазочная среда ТС-1)

Для проверки теоретических и экспериментальных результатов проведенных исследований неравновесной самоорганизации проведены исследования трибосистем диск-диск 30Х3ВА, на рабочую поверхность которых наносились покрытия MoN – TiAlN с различной толщиной на подслое закаленную до определенной твердости.

Первая группа опытов предусматривала исследование износостойкости данных покрытий нанесенных на рабочие поверхности закаленные до большого значения твердости, и результаты испытаний приведены в работе [8]. В соответствии принятой терминологии прогнозируемый износ был отнесен к наноизносу I рода. Вторая группа опытов предусматривала исследование износостойкости трибосистемы, в которой покрытие MoN наносилось на поверхностный слой закаленной до низкого значения твердости, а покрытие TiAlN также как и в первой группе опытов наносилось на поверхностный слой до большого значения твердости. В этом случае мы создавали условия неравновесной самоорганизации, обнаруженные при управлении тепловым потоком в трибосистеме диск-диск 12Х2Н4А (смазочная среда БЗВ). Изнашивание в данном случае классифицировалось как наноизнашивание II рода (за счет неравновесной самоорганизации).

Результаты испытаний трибосистем работающих в режиме наноизнашивания I и II рода (рис. 16) (достигнутого за счет снижения уровня активации и перехода от равновесной к неравновесной самоорганизации поверхности трения) показали, что триботехнические показатели при неравновесной самоорганизации, (наноизнашивание II рода) достигнутые за счет оптимизации послойного микроструктурного состава значительно выше, чем трибосистемы работающей в режиме наноизнашивания I рода (на рис. 16 отображены усредненные значения триботехнических показателей).

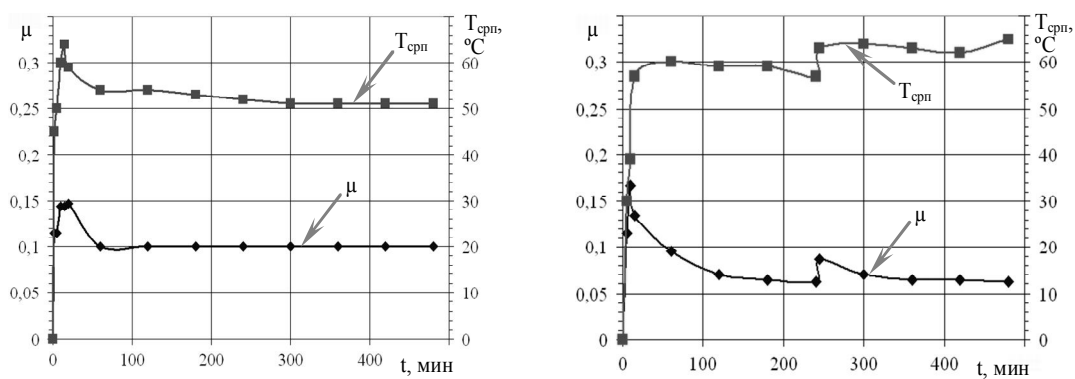
Испытания проводились в течении 8 часов при скорости скольжения 0,5 м/с; нагрузке – 1600 Н; смазочная среда ТС-1; внешняя удельная энергетическая нагрузка $PV=3,785 \text{ Вт/мм}^2$. С учетом вышеизложенного и результатов исследований на изнашивание проведем классификацию видов наноизнашивания по расчетным значениям коэффициента диссипации внешней подводимой энергии к трибосистеме (табл. 1). Наноизнашиванию I рода соответствует значение коэффициента диссипации внешней подводимой энергии 0,0836...0,0928%, для наноизнашивания II рода, это значение уменьшается на два порядка и находится в пределах $6,86 \times 10^{-4} \dots 6,94 \times 10^{-4}\%$. Эти результаты дают понимание о более высоком уровне неравновесной самоорганизации перед равновесной.

Выводы

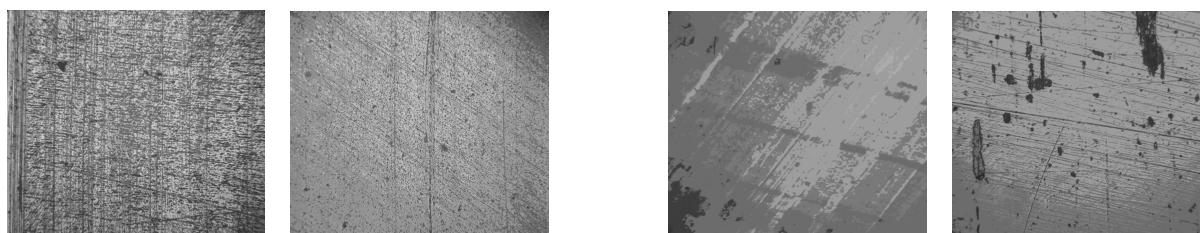
Подводя итог вышеизложенному, можно сделать следующий вывод, что разработанная методология использования метода АЭ по оценке скорости изнашивания различных трибосистем позволяет отнести этот метод к нанотехнологиям. Как показали результаты и экспериментальных и теоретических исследований метод АЭ может быть эффективным средством трибодиагностики, а также инструментом в изучении процессов неравновесной самоорганизации происходящих в трибосистемах в результате подвода к ним внешней энергии в виде тепла, механических воздействий и т.д. Таким образом, создаются предпосылки к развитию не только прикладных, но и фундаментальных исследований в науке трибологии. Использование предложенных информативных параметров АЭ и критериев оценки технического состояния трибосистем позволяет определить общую закономерность механизмов изнашивания разных трибосистем, найти варианты действия на механизм диссипации энергии и избыточное производство энтропии трибосистемы в процессе изнашивания. Это дает возможность определить механизмы появления и условия существования на поверхностях трения неравновесных диссипативных структур, которые могут владеть уникальной износостойкостью. В качестве критерия вида наноизноса предложено использовать коэффициент диссипации внешней подводимой энергии к трибосистеме.

Список литературы

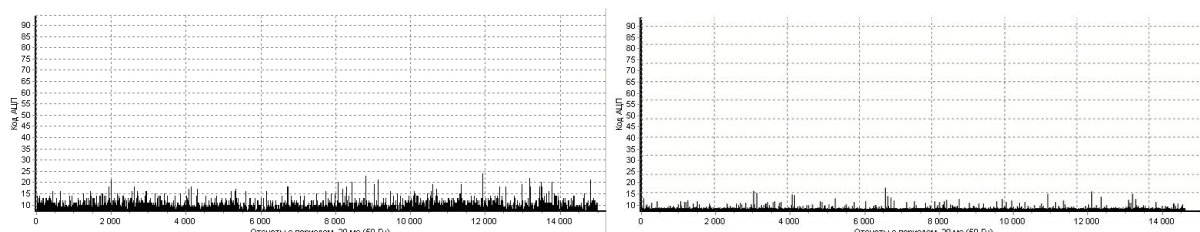
1. Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов и др. – К.: Техника, – 1976. – 296 с.
2. Погодаев Л.И. Структурно-энергетическая модель изнашивания / Л.И. Погодаев и др. // Трение и износ. – 2001. – Т. 22, №2. – С. 168-172.
3. Стадниченко В.Н. Диагностика процессов изнашивания фрикционных узлов трансмиссий авиационных ГТД методом акустической эмиссии / В.Н. Стадниченко // Вопросы проектирования и производства конструкций ЛА. – Х.: НАУ «ХАИ», 2010. – Вып. 1(61). – С. 108-117.



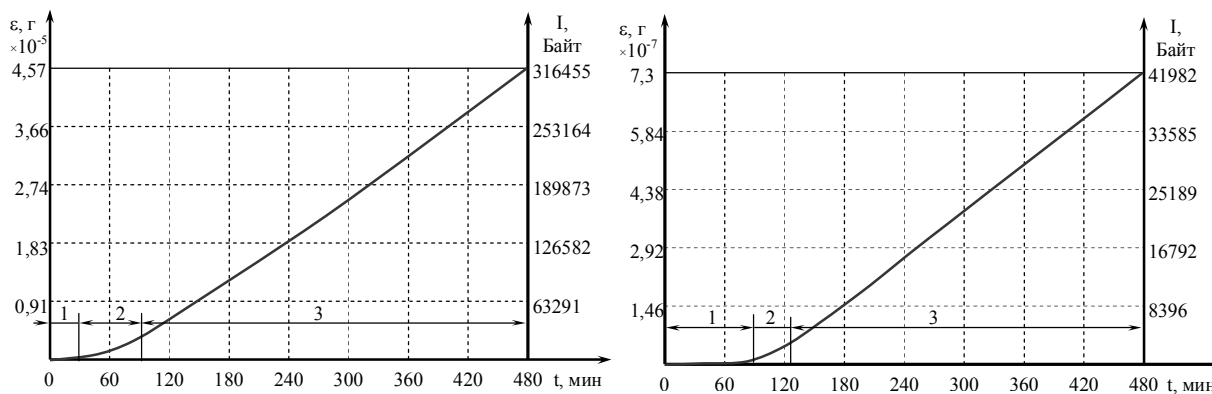
Изменений триботехнических показателей



Микрофотографии поверхностей трения



Диаграммы изменения усредненной мощности АЭ на стационарном участке изнашивания



Динамика изменения скорости изнашивания

а

б

Рис. 16. Характер изменения триботехнических характеристик при изнашивании трибосистем в режиме наноизнашивания: а – наноизнашивание I рода; б – наноизнашивание II рода (1 – латентный период накопления повреждений; 2 – приработка; 3 – стационарное изнашивание)

4. Filonenko S.F. Research of influence of thermal resistance of elements of tribosystem on wearproofness of friction units / S.F. Filonenko, V.N Stadnichenko, O.N. Troshin // Proceeding of the forth world congress "Aviation in the XXI-st century" "Safety in aviation and space technology, NAU, 2010. Volume 1. – P. 12.1-12.4.

5. Запорожец В.В., Стадніченко В.М. Методология ускоренной оценки износостойкости образцов с электроискровыми покрытиями // Проблемы трибологии. – 2010. - №4. – С. 25-32.

6. Запорожец В.В. Динамика задиростойкости и переходные процессы образцов с электроискровыми покрытиями / В.В. Запорожец, В.М. Стадніченко // Проблемы

трибологии. – 2010 – №4. – С. 47-52.

7. Стадніченко В.М. Прогнозування ресурсу трибосистем з використанням інформативних параметрів акустичної емісії / В.М. Стадніченко, М.Г. Стадніченко, В.В. Варваров // «Новітні технології для захисту повітряного простору»: Матеріали Шостої наукової конференції ХУПС. – 2010 – С. 55.

8. Стадніченко В.Н. Прогнозирование ресурса трибосистем, работающих в режиме наноизнашивания, методом акустической эмиссии / В.Н. Стадніченко, О.Н. Трошин, А.В. Приймак, Е.А. Кисель, Р.С. Веретельников, К.А. Гуржий // Збірник наукових праць ХУПС – 2010. – №4(26). С. 132-139.

Таблиця 3

Класифікація видів нанозносу по величині коефіцієнта дисипації зовнішньої підводимої енергії к трибосистемі

№ експеримента	Износ, ε , г	Информация, I, байт	$\xi_{\text{АЭ}}$, г/байт	Усредненная мощность АЭ с единицы площади контактного взаимодействия, W^* , Вт/мм ²	Подведенная мощность на единицу площади контактного взаимодействия, W_L , Вт/мм ² за время испытаний (8 часов)	Кoeffициент дисипации внешней подводимой энергии, ξ^{**} , %
<i>Нанознос I рода</i>						
1.	0,0000506	3521126	$1,4473 \times 10^{-11}$	0,281	30,28	0,0928
2.	0,0000513	3571428	$1,4464 \times 10^{-11}$	0,285		0,0941
3.	0,0000510	3546099	$1,4468 \times 10^{-11}$	0,283		0,0935
4.	0,0000505	3511660	$1,4474 \times 10^{-11}$	0,280		0,0925
5.	0,0000505	3512260	$1,4474 \times 10^{-11}$	0,280		0,0925
6.	0,0000505	3511440	$1,4474 \times 10^{-11}$	0,280		0,0925
7.	0,0000500	3472222	$1,4481 \times 10^{-11}$	0,277		0,0915
8.	0,0000487	3378378	$1,4497 \times 10^{-11}$	0,270		0,0892
9.	0,0000477	3311258	$1,4509 \times 10^{-11}$	0,264		0,0872
10.	0,0000457	3164556	$1,4537 \times 10^{-11}$	0,253		0,0836
<i>Нанознос II рода</i>						
11.	$7,357 \times 10^{-7}$	42346	$1,738 \times 10^{-11}$	0,00338	30,28	$6,92 \times 10^{-4}$
12.	$7,343 \times 10^{-7}$	42459	$1,7382 \times 10^{-11}$	0,00339		$6,94 \times 10^{-4}$
13.	$7,397 \times 10^{-7}$	41982	$1,7387 \times 10^{-11}$	0,00335		$6,86 \times 10^{-4}$

9. Стадніченко В.М. Моделювання сигналів акустичної емісії при різних механізмах руйнування поверхневого шару трибосистем / В.М. Стадніченко // Проблеми тертя та зношування. – 2007. – №1, С. 30-36.

10. Николас Г. Познание сложного / Г. Николас, Пригожин. Пер. с англ. – М.: Мир, – 1990. – 344 с.

11. Иванова В.С. Анализ критических точек трибосистемы на стадии приспособляемости с позиции синергетики. / В.С. Иванова, Б.И. Семенов, Э.В. Браун // Вестник машиностроения, 1998. – №10. – С. 3-11.

12. Иванова В.С. Синергетика: прочность и разрушение металлических материалов / В.С. Иванова – М.: изд. РАН. – 1992. 160 с.

13. Владимиров В.И. Проблемы физики трения и изнашивания / В.И. Владимиров // Физика износостойкости поверхности металлов. – Л., 1988. – С. 8-11.

14. Масштабное переупорядочение структуры и энтропийные эффекты при трении и износе металлов / Л.И. Бершадский // Физика износостойкости поверхности металлов. – Л., 1988. – С. 166-182.

15. Запорожец В.В. О механизмах подвижности металлокерамического слоя в технологиях триботехнического восстановления деталей / В.В. Запорожец, В.М. Стадніченко, О.Н. Трошин // Військово-технічний збірник Академія Сухопутних військ, Львів: АСВ, – 2010. – №3. – С. 101-106.

Надійшла до редакції 27.01.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.А. Калкаманов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

КЛАСИФІКАЦІЯ ВИДІВ НАНОЗНОШУВАННЯ ПО ЗНАЧЕННЮ КОЕФІЦІЄНТА ДИСИПАЦІЇ ЗОВНІШНЬОЇ ЕНЕРГІЇ, ЩО ПІДВОДИТЬСЯ, ДО ТРИБОСИСТЕМИ

В.М. Стадніченко, О.М. Трошин, М.Г. Стадніченко, А.В. Приймак, І.І. Просянік

В статті розглянуто методологія застосування методу акустичної емісії при вирішенні задач діагностики і прогнозування ресурсу трибосистем, що працюють в режимах нанозношування. Розроблений критерій оцінки видів нанозношування. Проведений порівняльний аналіз рівня різних видів нанозношування і їх класифікація в умовах рівноважної і не рівноважної самоорганізації трибосистем.

Ключові слова: трибосистема, нанотехнології, акустична емісія, зношування, класифікація видів нанозношування, дисипація зовнішньої енергії, що підводиться, прогнозування.

CLASSIFICATION OF TYPES OF NANOWEAR ON VALUE OF COEFFICIENT OF DISSIPATION OF THE EXTERNAL ENERGY TRICKED INTO TO TRYBOSYSTEM

V.N. Stadnichenko, O.N. Troshin, N.G. Stadnichenko, A.V. Priymak, I.I. Prosyaniuk

In article it is considered methodology of application of method of acoustic emission at the decision of tasks of diagnostics and prognostication of resource of trybosystem, working in the modes of nanowear. The criterion of estimation of types of nanowear is developed. The comparative analysis of level of different types of nanowear and their classification in the conditions of equilibrium and nonequilibrium self-organising of trybosystem is conducted.

Keywords: trybosystem, nanotechnology, acoustic emission, wear, classification of types of nanowear, dissipation of the external energy tricked into, prognostication.