

УДК.621.891:621.316

Запорожец В.В., Стадниченко В.Н.

Национальный авиационный университет. Украина, г. Киев

ИДЕНТИФИКАЦИЯ «НАНОИЗНОСНЫХ» РЕЖИМОВ ТРЕНИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Анотація

В даній статті розглянута методологія використання методу акустичної емісії при вирішенні задач ідентифікації механізмів зношування трибосистем, а також прогнозування їх ресурсу.

Abstract

In this article the methodology of the acoustic emission method for fixing of problems of the identification of wear mechanisms of tribosystems and a prediction of their resource are presented.

Постановка проблемы:

Анализ современных достижений в области трибологии позволяет сказать, что на сегодняшний день существуют два подхода к повышению срока службы деталей [1, 2, 3]:

– снижение уровня активации за счет оптимизации физико-механических свойств вторичных структур (образование равновесных диссипативных структур) возникающих на поверхности трения;

– улучшение приспособляемости материалов в трибосистеме (образование неравновесных диссипативных структур).

При первом подходе создаются структуры, которые были бы стабильны при возможно большем внешнем воздействии. Второй подход предусматривает создание структур, способных эффективно рассеивать подводимую энергию в момент пика напряжений с помощью преобразований на различных структурных уровнях. Что обеспечивает работу трибосистем в «наноизносном» режиме трения. Под «наноизносном» режимом авторы работ [4, 5] подразумевают режим изнашивания, при котором суммарный износ трибосистемы не может быть измерен после 8-ми часов непрерывных испытаний на максимальных эксплуатационных режимах весовым методом с точностью 10–5 грамма при этом линейная интенсивность изнашивания поверхности фрикционного контакта составляет $10^{-8} - 10^{-11}$ м/м.

Однако, нерешенной проблемой остается возможность получения информации о кинетике и физической природе процессов, которые сопровождают наноизнашивание поверхностей фрикционного контакта в реальном масштабе времени. Однако, высокая чувствительность метода акустической

эмиссии (АЭ) к процессам поверхностного разрушения [6, 7] вероятно может дать возможность классифицировать механизмы износа трибосистем, в том числе и те которые характеризуются аномально низкой интенсивностью изнашивания.

Целью работы является акусто-эмиссионная идентификация механизмов наноизнашивания.

Результаты исследований:

Испытание на трение и износ проходили при качении с 20% проскальзыванием трибоэлементов (дисков), выполненных из хромоникелевых сталей (12Х2Н4А) на максимальных эксплуатационных нагрузках – 1600 Н; скорость скольжения – 0,5 м/с; смазочная среда БЗВ. Смазка осуществлялась окутанием нижнего диска в ванну с маслом. Испытания проводили в специальной камере разделенной диафрагмой по линии контакта (рис. 1), дающей возможность проводить подогрев нижнего диска помощью нагревательного элемента, размещенным в масле, а верхний диск охлаждался продувом холодного воздуха через верхнюю часть камеры (рис. 1).

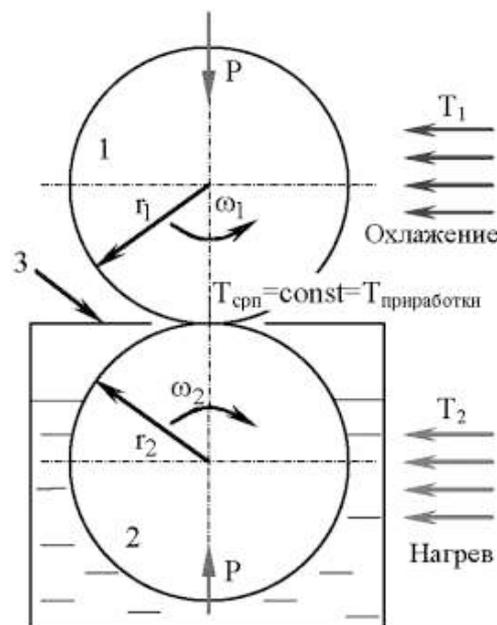


Рис. 1. Принципиальная схема перевода трибосистемы «диск–диск» из условий равновесной самоорганизации к условиям неравновесной за счет создания теплового потока через линию контакта:

1, 2 – трибоэлементы, 3 – разделяющая диафрагма;
 T_1, T_2 – температура нагрева и охлаждения; $T_{срп}$ – среднеповерхностная температура в контактной области; ω_1, ω_2 – угловые скорости для первого и второго трибоэлементов соответственно; r_1, r_2 – радиусы первого и второго трибоэлементов соответственно



В ходе испытаний проходила регистрация акусто-эмиссионного излучения, причем сигналы АЭ принимались датчиком, размещенным в волноводе через масляный клин. В качестве информативных параметров АЭ использовалась усредненная мощность акустической эмиссии (W_{yc}), информация об износе в безразмерных единицах (I) и удельная эмиссионная активность (ξ_{ac}). Величина усреднения выбиралась с учетом скорости вращения приводного вала машины трения и составляла 20 мС. Методика определения значений данных параметров изложена в работе

Для перехода трибосистем за границу устойчивости использовалась следующая методика. Первоначально проводилась приработка трибосистемы до стабилизации значений всех основных триботехнических параметров, а именно коэффициента трения и температуры в зоне трибологического контакта. Далее 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 «наноизносный» режим трения. Переход в «наноизносный» режим трения фиксировался с помощью акустической эмиссии по резкому падению средних значений (W_{yc}) до уровня значений $2-3 \times 10^{-8}$ Вт. Таким образом, воспроизводились термодинамические условия, которые создавались авторами работы [8] при 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 постоянном значении подведенной к трибосистеме мощности: $W_L = \text{const}$. При этом неравновесное стационарное состояние характеризуется двумя уровнями значений интенсивности изнашивания (рис. 2). Измерение интенсивности изнашивания проводилось в относительных информационных единицах в соответствии с методикой, изложенной в работе [8]. Время нахождения трибосистемы на каждом из этих уровней составляло 4...5 часов. На каждом из уровней были проведены комплексные металлофизические исследования поверхностей трения (рис. 3, 4, 5).

Проанализируем полученные выше результаты. Поскольку материал представляет собой открытую термодинамическую систему, то под действием внешнего воздействия в данном случае теплового потока в нем возможно протекание как линейных, так и нелинейных процессов рассеивания энергии подводимой при трении. Дислокация в металле имеет собственное поле напряжений и является элементарным носителем энергии в системе. Ламинар-

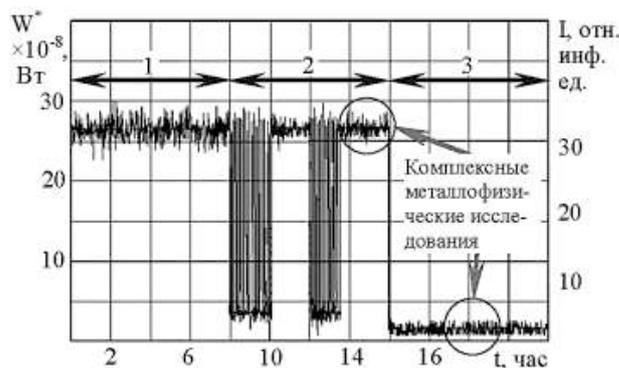


Рис. 2. Диаграмма изменения скорости изнашивания в единицах измерения мощности АЭ при переходе в режим наноизносного трения трибосистемы диск-диск 12Х2Н4А (смазочная среда БЗВ):

1 — установившийся режим изнашивания; 2 — точка бифуркации; 3 — режим наноизносного трения

ное, хаотическое движение дислокаций вследствие взаимодействия с внешним полем напряжений является линейным процессом диссипации энергии. Структурно — это зарождение, скольжение, переползание дислокаций, приводящее к образованию различных дислокационных построений.

Нелинейный процесс диссипации энергии — это явление самоорганизации путем упорядочения потоков энергии в системе. В результате самоорганизации за счет создания дополнительного теплового потока через линию контакта в трибосистеме происходит согласованное, коллективное перемещение субмикроструктурных дефектов. Смена хаотического движения дислокаций на упорядоченное — неравновесный фазовый переход. Он обусловлен локальной неустойчивостью скоплений дислокаций в эффективном объеме взаимодействий. Условия его возникновения (точка бифуркации) (рис. 1, поз. 2), связаны с появлением флуктуаций химического и структурного состояния обусловленного большими градиентами напряжений. Структурно самоорганизация потоком энергии в этом случае выражается в коллективном движении дислокаций и построении дислокационных стенок субграниц в подповерхностном слое, где эти напряжения максимальны.

Так как субграница — это место сопряжения разориентированных объемов, то ее образование геометрически означает поворот решетки. Таким образом, ротация (ротационные моды) — это результат согласованных, коллективных дислокационных построений вследствие самоорганизации потоков энергии в трибосистеме. Механизм ротационной подвижности, связан с проскальзыванием образовавшихся ультрадисперсных фрагментов относительно, друг друга [9, 10, 11], что обеспечивает в поверхностных слоях большие пластические деформации (рис. 3).

При этом разворот фрагментов структуры осуществляется вокруг оси, перпендикулярно направлению трения и параллельной поверхности скольже-

ния, что подтверждено результатами Фурье-анализа пространственной ориентации субблоков структуры поверхностных слоев в трибосистеме (рис. 4).

Рассмотрим изменения структурной организации поверхностных и подповерхностных слоев происходящих при трении и износе материалов данной трибосистемы при переходе к «наноизносному» режиму трения с позиций физической мезомеханики.

Проведенные авторами работ [9–13] 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.

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. 5) 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.

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, 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 разрушения поверхностного слоя увеличивается,

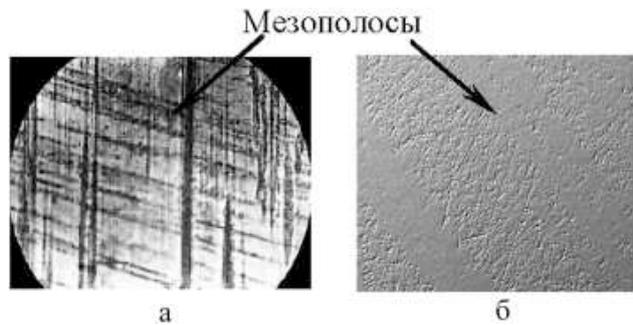


Рис. 3. Фрактография поверхности верхнего диска трибосистемы диск-диск 12Х2Н4А (смазочная среда БЗВ) при переходе трибосистемы к минимальной интенсивности изнашивания: а – x250; б – x5000

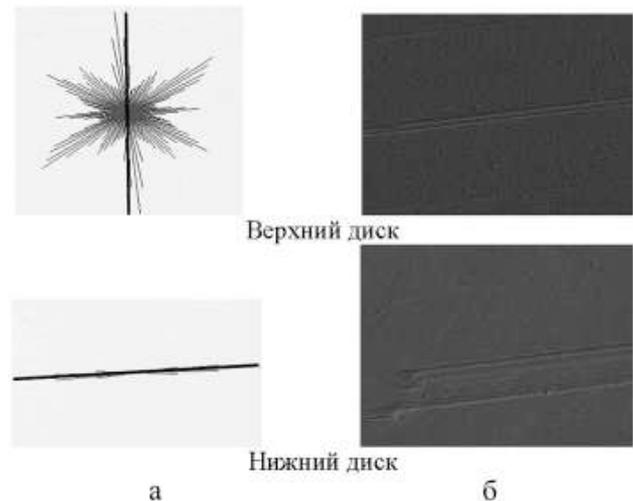


Рис. 4. Фурье анализ пространственной ориентации субблоков структуры поверхностей трения трибосистем при минимальной интенсивности изнашивания: а – направление ориентации субблоков структуры; б – микрофотографии поверхностей трения x1050

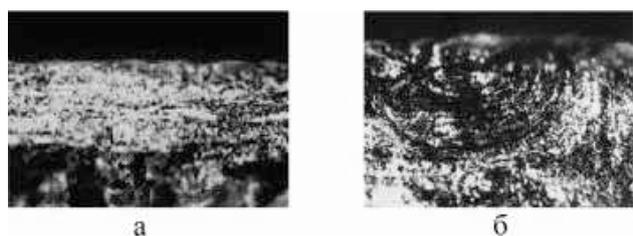


Рис. 5. Фрактографические исследования поверхности трения верхнего образца трибосистемы диск-диск 12Х2Н4А (смазочная среда БЗВ) при переходе в наноизносный режим трения x10000: а – микрошлиф поверхностного слоя при переходе к наноизносного режима трения; б – фрагмент ротационной структуры

изменяется градиент напряженного состояния в поверхностном слое и через точку бифуркации трибосистема переходит в первоначальное состояние.

Создавая тепловой поток через контактную область в данном эксперименте создавались условия квазиравновесного термодинамического состояния

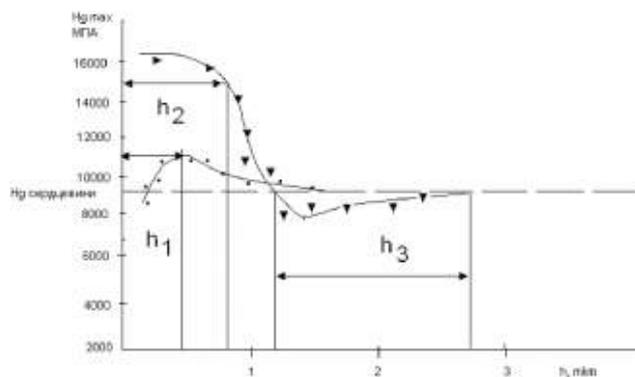


Рис. 6. Распределение твердости по толщине поверхности трения верхнего образца трибосистемы 12Х2Н4А–БЗВ при переходе в «наноизносный» режим трения где: h_1 – толщина упрочненного слоя нижнего образца h_2 – толщина упрочненного слоя верхнего образца h_3 – толщина пластифицированного верхнего образца

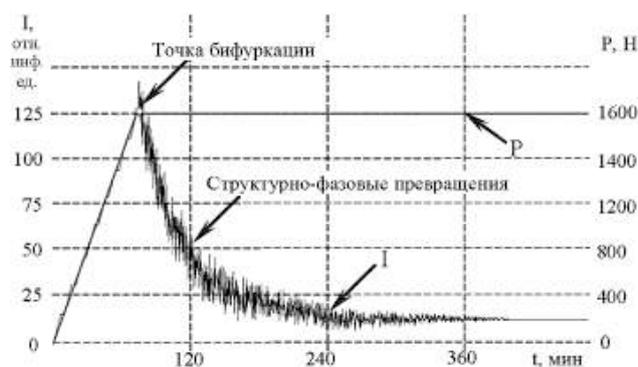


Рис. 7. Динамика изменения скорости изнашивания трибосистемы ВБ23НЦ–30Х3ВА

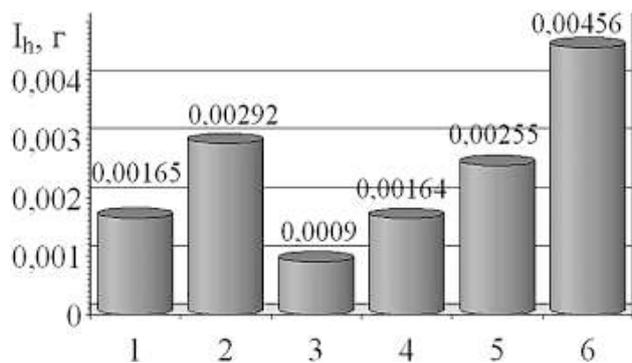


Рис. 8. Весовой износ элементов трибосистемы ВБ23НЦ–30Х3ВА:

1, 2 – неподвижный трибоэлемент; 3, 4 – подвижный трибоэлемент; 5, 6 – суммарный износ трибоэлементов

для нижнего диска и вывод термодинамического состояния верхнего диска далеко за уровень равновесия. Этот методический подход впервые позволил за счет экспорта 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 подтвердили высказанную выше гипотезу и позволили установить следующие закономерности: при переходе к «наноизносному» режиму трения. 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).

Таким образом, в результате неравновесной организации поверхности трения поверхностный слой верхнего образца в результате этих процессов представляет собой двухслойную оболочку: верхний слой, предельно упрочненный и упругий, нижний слой – пластичный, прилегающий к матрице из основного материала. Что подтверждается результатами измерения микротвердости поверхностных слоев трибоэлементов по глубине (рис. 6). Измерение микротвердости методом интерполяционных кривых (рис. 13) показало, что микротвердость поверхности трения увеличивается на 6120 МПа и составляет 16200 МПа, толщина упрочненного слоя 0,75 мкм. Микротвердость пластифицированного подслоя составляет 7600 МПа. Граница между подслоями не является геометрически плоской.

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. 7) 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.

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. 8.

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 обусло-

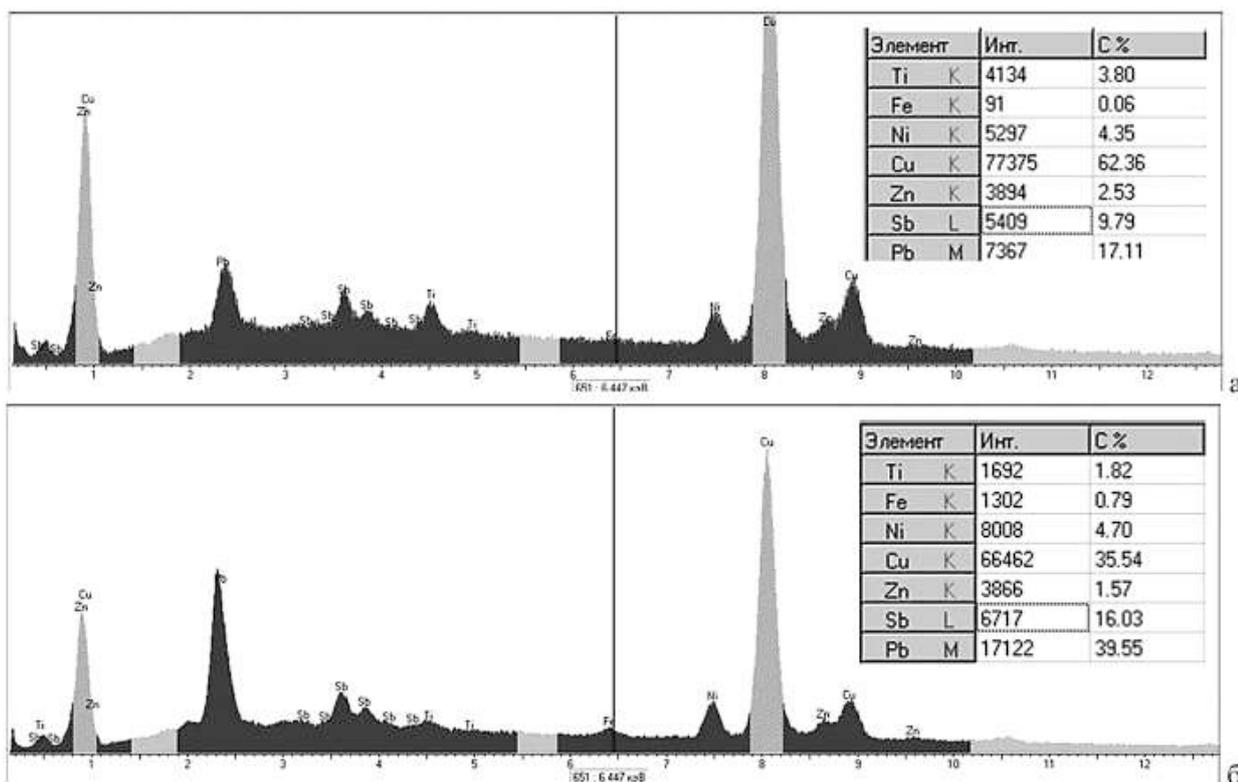


Рис. 9. Результаты исследования химического состава поверхностей трения в средней части дорожки трения:

а – нагрузка 1400 Н; б – нагрузка 1600 Н

вил переход на новый уровень триботехнических показателей. Результаты химического анализа поверхностных слоев отображено на рис. 9. 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. 10.

Результаты химического анализа показали, что переход к неравновесной самоорганизации сопровождается скачкообразным увеличением процентного содержания железа более чем 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. 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 про-

является потемнением рабочей поверхности. При разборке топливных насосов, которые поступают в ремонт поверхности имеют характерный 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. 11).

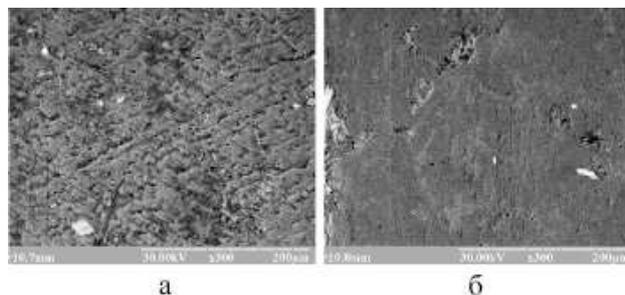


Рис. 10. Фрактографические исследования бронзовых образцов $\times 300$:

а – нагрузка 1400 Н; б – нагрузка 1600 Н

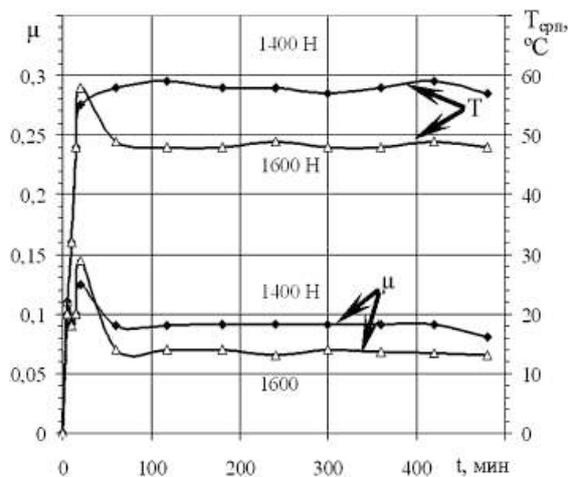


Рис. 11. Диаграмма изменения триботехнических параметров во времени для различных нагрузок

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.

Для проверки теоретических и экспериментальных результатов проведенных исследований неравновесной самоорганизации проведены исследования трибосистем диск-диск 30X3BA, на рабочую поверхность которых наносились покрытия MoN – TiAlN с различной толщиной на подложку закаленную до определенной твердости. Результаты исследований приведены на рис. 12.

Первая группа опытов предусматривала исследование износостойкости данных покрытий нанесенных на рабочие поверхности закаленные до большого значения твердости, и результаты испытаний приведены в работе [7].

В соответствии принятой терминологии прогнозируемый износ был отнесен к наноизносному режиму трения 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.

Таким образом, мы создавали условия неравновесной самоорганизации, обнаруженные при управление тепловым потоком в трибосистеме диск-диск 12X2H4A (смазочная среда БЗВ). Изнашивание в данном случае классифицировалось как наноизносный режим трения II рода (за счет неравновесной самоорганизации).

Результаты испытаний трибосистем работающих в режиме наноизносного трения I и II рода (рис. 12)

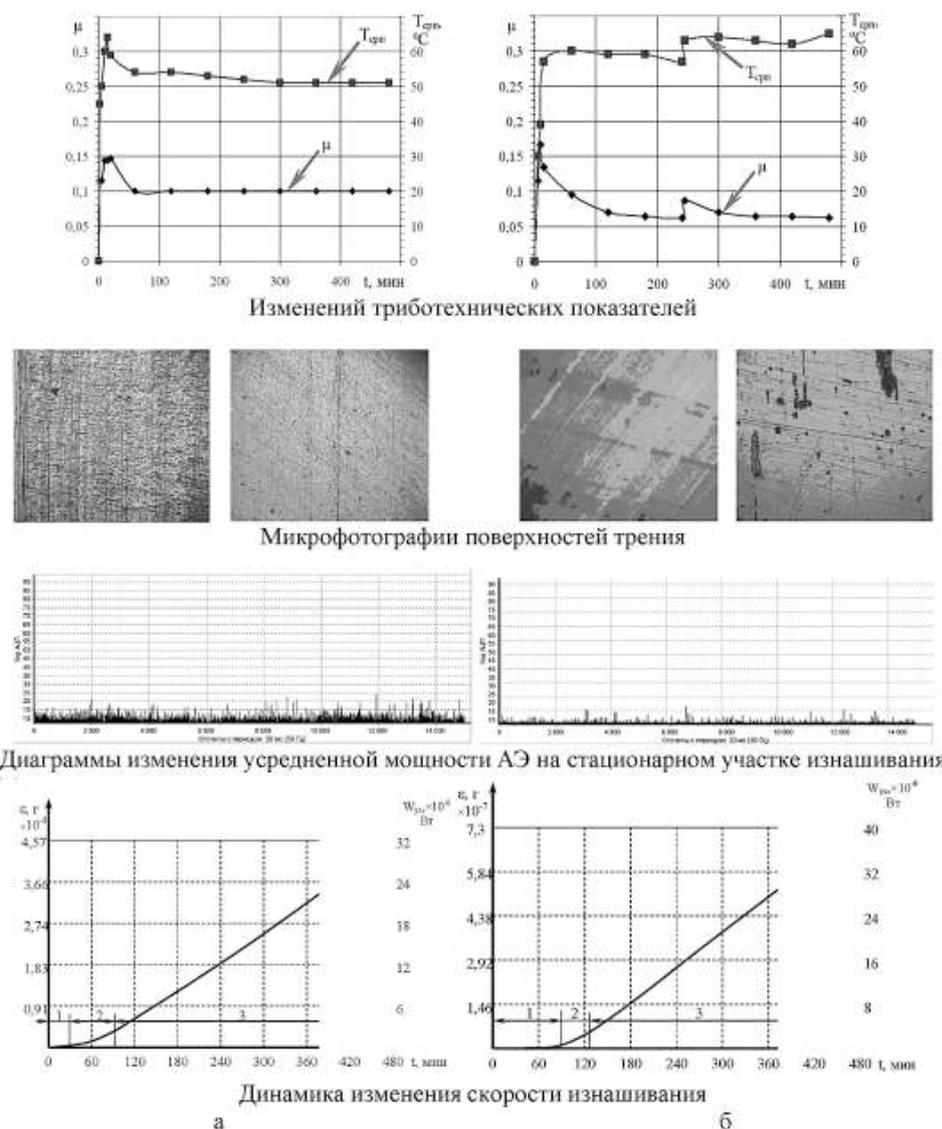


Рис. 12. Характер изменения триботехнических характеристик при изнашивании трибосистем в режиме наноизносного изнашивания:
 а – I рода; б – II рода (1 – латентный период накопления повреждений; 2 – приработка; 3 – стационарное изнашивание)

Таблица 1

Классификация видов наноизносных режимов трения по величине коэффициента диссипации внешней подводимой энергии к трибосистеме

№ эксп.	Износ, ϵ , г	Информация, I , отн. инф. ед.	$\xi_{\text{АЭ}}$, г/отн. инф. ед.	Усредненная мощность АЭ с единицы площади контактного взаимодействия, W , Вт/мм ²	Подведенная мощность на единицу площади контактного взаимодействия, W_c , Вт/мм ² за время испытаний (8 часов)	Коэф-т диссипации внешней подводимой энергии, ξ , %
Наноизносный режим трения I рода						
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
Наноизносный режим трения II рода						
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		$6,86 \times 10^{-4}$

(достигнутого за счет снижения уровня активации и перехода от равновесной к неравновесной самоорганизации поверхности трения) показали, что триботехнические показатели при неравновесной самоорганизации, (наноизносный режим трения II рода) достигнутые за счет оптимизации послойного микроструктурного состава значительно выше, чем трибосистемы работающий в режиме наноизносного режима трения I рода (рис. 12 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 наноизносного режима трения по расчетным значениям коэффициента диссипации внешней подводимой энергии к трибосистеме (табл. 1).

Наноизносный режим трения I рода соответствует значению коэффициента диссипации внешней подводимой энергии 0,0836...0,0928%, для наноизносного режима трения II рода, это значение уменьшается на два порядка и находится в пределах $6,86 \times 10^{-4}$... $6,94 \times 10^{-4}$ %.

Эти результаты дают понимание о более высоком уровне неравновесной самоорганизации поверхностей фрикционного контакта перед равновесной.

Выводы

Разработанная методика обработки акустико-эмиссионного излучения и определения скорости изнашивания, позволяющая регистрировать скорость изнашивания с отделением первой частицы материала трибосистемы в информационных единицах [отн. инф. ед./с]. Применение данной методики позволяет определить общие закономерности механизмов изнашивания разных трибосистем, как при равновесной, так и неравновесной самоорганизации трибосистем при управлении тепловым потоком, разработать критерии оценки их технического состояния, а также методики прогнозирования

ресурса машин и механизмов. Таким образом, метод АЭ можно отнести к нанотехнологиям в измерении износа.

Фундаментальной величиной, который определяет устойчивости трибосистемы в условиях неравновесной самоорганизации является производство избыточной энтропии $P[\delta S]$ [8]. 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 $(\delta^2 S)_{\text{тс}}$ по времени носит колебательный характер (рис. 13).

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 $(\delta^2 S)_{\text{тс}} \leq 0$. При постоянном подводе энергии изменение $(\delta^2 S)_{\text{тс}}$ по времени имеет вид (рис. 14), что обес-

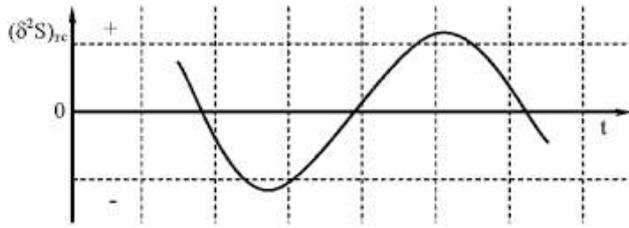


Рис. 13. Изменение прироста производства избыточной энтропии $(\delta^2 S)_{\text{ex}}$ по времени испытания в условиях неравновесного самоупорядочивания трибосистемы при управлении тепловым потоком

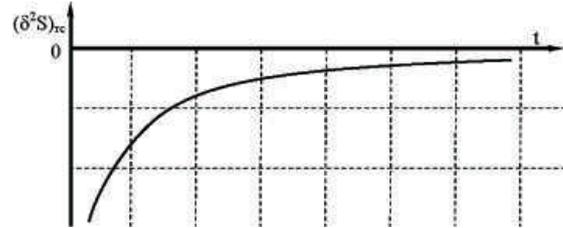


Рис. 14. Изменение прироста производства избыточной энтропии $(\delta^2 S)_{\text{ex}}$ по времени, в условиях неравновесного самоупорядочивания трибосистемы ВБ23НЦ – 30Х3ВА (смазочная среда ТС-1)

печивает 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 $(\delta^2 S)_{\text{ex}}$ после приработки равна нулю. Это и объясняет кардинальное различие в поведении трибосистем работающих в условиях неравновесной самоорганизации.

Предложена классификация наноизносных режимов на основе значений коэффициента диссипации внешней подводимой энергии. Так, при равновесной самоорганизации поверхностей трения (наноизносный режим I рода) значение коэффициента диссипации внешней подводимой энергии находится в пределах 0,0836...0,0928%. При неравновесной самоорганизации поверхностей трения (наноизносный режим II рода), это значение уменьшается на два порядка и находится в пределах $6,86 \times 10^{-4}$... $6,94 \times 10^{-4}\%$. Что свидетельствует о более высоком уровне неравновесной самоорганизации поверхностей фрикционного контакта перед равновесной.

Литература

1. Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий, И.Г. Новосовский, А.К. Караулов и др. — Киев: Техника, — 1976. — 296 с.
2. Свиреденок А.И. / Под ред. Белого В.А. / Акустические и электрические методы в триботехнике. — М.: Наука и техника, 1987. — 280 с.
3. Погодаев Л.И. Структурно-энергетическая модель изнашивания / Л.И. Погодаев и др. // Трение и износ. — 2001. — Т. 22, №2. — С. 168-172.
4. C. Jiaa, D. Dornfeld Experimental studies of sliding friction and wear via acoustic emission signal analysis //Wear. — 1990. — №139. — P. 403–424.

5. L. Wang, R. Wood, T. Harvey, S. Morris Wear performance of oil lubricated silicon nitride sliding against various bearing steels // Wear. — 2003. — №255. — P. 657–668.

6. Филоненко С.Ф. Акустическая эмиссия. Изменение, контроль, диагностика. — К.: КМУГА, 1999. — 312 с.

7. Запорожец В.В., Стадниченко В.М. Методология ускоренной оценки износостойкости образцов с электроискровыми покрытиями // Проблемы трибологии. — 2010. — №4. — С. 25–32.

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

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

10. 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.

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

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

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