

УСТРОЙСТВО ДЛЯ АНАЛИЗА ЭМИССИИ ЗВУКА ПРИ ТРЕНИИ.

Аннотация

Описана развитая авторами методика синхронной регистрации эмиссии колебаний и силы трения в парах трения полимер-полимер. Методика проиллюстрирована на примере пар трения полиоксиметилен (ПОМ)-ПОМ и ПОМ-полиэфирэфиркетон (ПЭЭК). Показана информативность метода в определении уровня работы трения, необходимой для инициирования процессов изнашивания полимера, приводящих к генерации колебаний. Обсуждена возможная связь процесса генерации звука с износом полимеров.

Ключевые слова: трение, износ, полимер, колебания, ультразвук.

Введение

Известно [1], что величина потери массы полимера в ходе изнашивания (Δm), называемая обычно износом, коррелирует с силой трения (F_{fr}) и/или отношением F_{fr} к величине нормальной нагрузки (F_n). В этой связи, большой интерес представляет выяснение механизмов изменения силы трения. В работе [2] нами сделано наблюдение, что переходы силы трения в паре ПОМ-ПОМ с нижнего на более высокий уровень ($F_{fr}^{min} \rightarrow F_{fr}^{max}$) коррелируют не только с образованием молекулярных продуктов трибодеструкции макромолекул ПОМ, но и с генерацией колебаний, приводящих к надежно регистрируемой в акустической области эмиссии звука. В случае динамического трения ПОМ по полимерам, находящимся в стеклообразном состоянии эти эффекты не регистрировались [2,3]. Эмиссия звука является дополнительным каналом диссипации энергии трения, что делает актуальным развитие прямых экспериментальных методик поиска корреляций силы трения и процесса АЭ [4]. В данной работе описана развиваемая нами методика регистрации АЭ и силы трения. Также обсуждены результаты, полученные с ее помощью для пар трения ПОМ-ПОМ, ПОМ-полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) и реперной пары трения политетрафторэтилен (ПТФЭ)-ПТФЭ в геометрии трения шар-по-плоскости.

Методы и материалы

Трибологическая установка, метод измерения и расчета силы трения (F_{fr}) описаны в работе [2] и ссылках в ней. Для реализации геометрии трения шар-по-плоскости установка была дополнительно модифицирована (рис. 1а). Шар (1) из ПОМ (DelrinTM), диаметром 6 mm жестко крепится в стальном цилиндрическом держателе (2). Ось шара отстоит от оси вращения цилиндра на $r=1.5\text{mm}$. Цилиндр (2) жестко закреплен во вращающемся вокруг своей оси штоке (3), закрепленном на

оси редуктора. Неподвижная пластина-контртело (4) прижимается к шару фиксированной силой F_n . В качестве контртела использовались как ПОМ так и ПЭЭК (VitrexTM). С обратной стороны пластины между ней и столом-держателем (5) стягивающими винтами (не показаны) плотно крепится датчик АЭ (6). Стол-держатель свободно вращается в керамических подшипниках, насаженных на ось 7. От трибоиндуцированного вращения стол-держатель сдерживается закрепленным на винте (8, он расположен на радиусе R от оси вращения) концом стального стержня. Второй конец этого стержня крепится на тензобалке (не показана), напряжение на которой преобразуется в величину силы с помощью системы регистрации на базе Arduino IDE. Расчет силы трения проводился по следующему соотношению:

$$F_{fr} = \frac{3}{2} \cdot F_b \cdot R \cdot \frac{r_1^2 - r_2^2}{r_1^3 - r_2^3} \quad (1)$$

где r_1 и r_2 – внешний и внутренний радиусы дорожки трения, F_b – регистрируемая тензобалкой сила. Это соотношение аппроксимирует площадку контакта сектором кольца трения с линейным размером равным линейному размеру площадки контакта, который оценивается как разность внешнего и внутреннего радиусов кольцевой дорожки трения. С высокой точностью это соотношение согласуется с более распространенной оценкой силы трения по соотношению: $F_b R = F_{fr} r$. Для расчетов ниже используется линейная скорость в центре шара: $V = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \nu$ (ν – частота вращения шара вокруг оси вращения). Более детальное рассмотрение кинематики движения шара по окружности можно найти в работе [5]. Эксперименты проведены в диапазоне скоростей скольжения $0.00159 \div 0.0263$ m/s и нагрузок в диапазоне $5 \div 72$ N. В работе проведен анализ некоторых полученных результатов и сделана попытка их анализа.

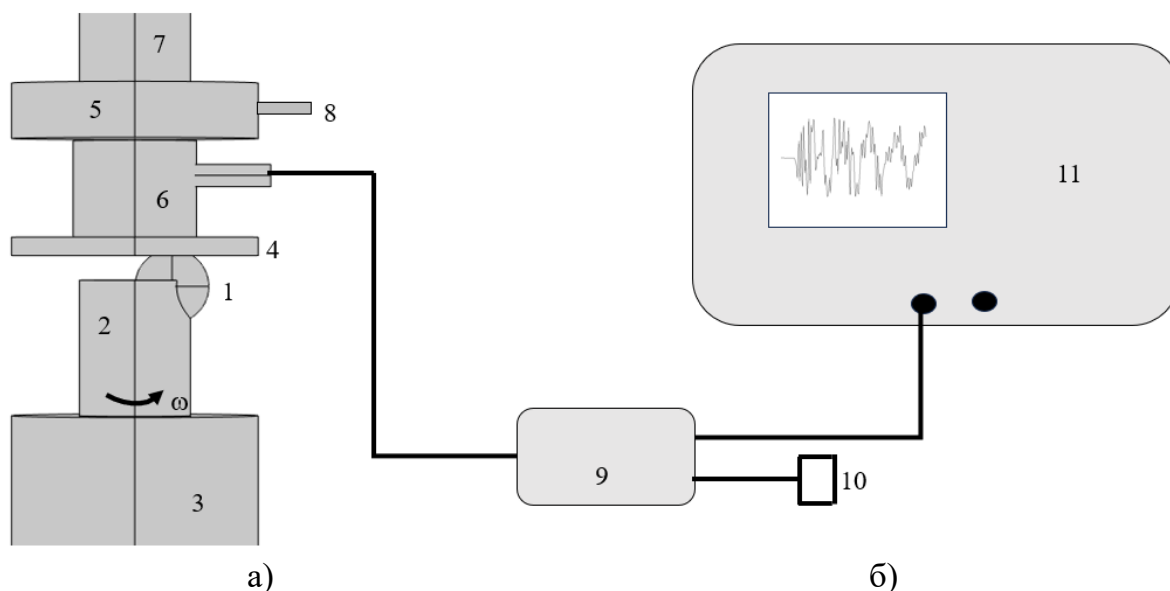


Рисунок 1 – Блок-схема системы регистрации. 1- плотно фиксированный в цилиндре (2) шар-контртело, 3 – вращающийся шток, закрепленный на оси вращения редуктора, 4- пластина-контртело, 5- свободно вращающийся стол – держатель, 6 – датчик АЭ, 7- устройство крепления стола, 8 – винт, расположенный на радиусе R (см. текст), на котором одним концом закреплен жесткий стержень, сдерживающий вращение стола при трении. Второй конец стержня закреплен на тензобалке (не показано), 9 – формирователь сигнала, 10- блок питания формирователя сигнала, 11 – осциллограф.

Для регистрации АЭ сигналов использовался датчик с зарядовым выходом 7С103НА (ООО ГТЛАБ, Саров, Россия). Его подключение к осциллографу DPO3032 Tectronix™ проводилось с помощью формирователя сигналов А422 той же фирмы. Схема подключения показана на рис. 1. Эксперименты проводились при различных частотах дискретизации. Во всех случаях выбранный временной участок регистрации спектра содержал 10^6 точек. В случае тестовых экспериментов с брусками, в качестве триггера использовался датчик 7С101НА (ООО ГТЛАБ, Саров, Россия). В случае трибологических экспериментов запись спектров в течение всего опыта запускалось в начале эксперимента. В этих экспериментах шаг регистрации событий акустоэмиссии был максимален и составлял 0.4 ms (время регистрации одиночного спектра 400 секунд). Кроме этого, в ходе трения проводились эксперименты с регистрацией спектров с меньшими временами регистрации одиночного спектра (до 0.4 секунд) в которых шаг регистрации одиночной точки спектра достигал 400 ns. Конкретные параметры экспериментов указаны в тексте. При увеличении времени регистрации одиночного спектра интенсивность спектра падала, что контролировалось уровнем чувствительности канала регистрации осциллографа (в диапазоне 50 mV-1 V). Все эксперименты по трению проведены при одинаковой чувствительности, что позволило провести сопоставление уровней АЭ сигналов в разных опытах.

Некоторые важные для описания параметров эксперимента свойства использованных материалов приведены в Табл. 1. В упругом приближении радиус контакта изотропных шара и плоскости оценивается как: $a = (\frac{3 \cdot F_n \cdot R}{4 \cdot E^*})^{1/3}$, E^* - приведенный модуль упругости. Для минимальных использованных F_n (~5 N) максимальные контактные давления в начале трения в центре шара находилось на уровне ~ 50 МПа что не достигает уровня твердости полимеров (σ_Y), для максимальных ($F_n \sim 70$ N) достигало ~ 170 МПа, что превышает этот уровень (Табл. 1). Анализ поверхности шара после трения показал, что износ вершины шара приводит к формированию на ней плоской площадки диаметром, достигающим, при максимальных мощностях трения, ~ 1 mm, на пластине формируется кольцо шириной достигающей близкой величины. При трении ПОМ по ПEEK диаметр изношенной площадки на шаре из ПОМ был существенно меньшим, что прекрасно согласуется с полученными нашими ранее данными в другой геометрии трения (кольцо-плоскость) [2], которые показали существенно меньшую интенсивность изнашивания ПОМ в паре ПОМ-ПEEK по сравнению с парой ПОМ-ПОМ. Таким образом, изнашивание может существенно (до ~ 10 МПа) снижать величину номинальных контактных давлений. В случае контакта шероховатых поверхностей, реальная начальная площадь контакта (A_0) в наших экспериментах можно оценить по соотношению: $\sigma_n/A_0 = \sigma_Y/S$, σ_Y -предел пластичности. Эта упрощенная оценка дает величину реальной площади контакта достигающей при максимальных контактных давлениях десятков процентов от номинальной площади контакта S до начала трибоиндуцированного разрушения поверхностей полимеров.

Таблица 1 – Основные свойства исследованных материалов

	ПОМ	PTFE	PEEK
ρ [kg/m ³]	1410	2200	1300
C_v [J/kgK]	1470	1500	1450
λ [W/(m·K)]	0.31	0.167÷0.3	0.26

	POM	PTFE	PEEK
$k = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_v}$ [m ² /sec]	$1.49 \cdot 10^{-7}$	$9.95 \cdot 10^{-7}$	$1.4 \cdot 10^{-7}$
T _g , * [K]	182	140÷400 160	460
T _m , ** [K]	442	600	600
σ _Y [Brinell hardness, MPa]	140	50	280
E [Young modulus, GPa]	3	0.5	3.9

* - glass transition temperature

** - melting temperature

Результаты и обсуждение

Использованный в работе датчик АЭ был апробирован с использованием модельной задачи на определение частот собственных колебаний брусков из стали, полиметилметакрилата (ПММА) и POM заданных размеров. Использовались бруски стали с размерами 65 см x 3 см x 5 см, ПММА с размерами 64 см x 5.1 см x 2.4 см, POM с размерами 49.5 см x 5.2 см x 1.2 см. Сигнал генерировался как с использованием стандартного источника колебаний типа Су-Нильсена (использовался слом графитового стержня диаметром 2 мм), так и удара стального шарика по торцу бруска. Оба способа генерации колебаний приводили к близким результатам. На рис. 2а показаны типичные АЭ сигналы, генерируемые источником типа Су-Нильсена, регистрируемые датчиком, расположенном в центре торца противоположного тому торцу, на котором генерировались колебания. Видно, что затухание сигналов существенно сильнее в полимерах. Эксперименты на брусках других размеров приводил к качественно подобным описанному ниже результатам. На рис. 2б показаны преобразования Фурье этих сигналов.

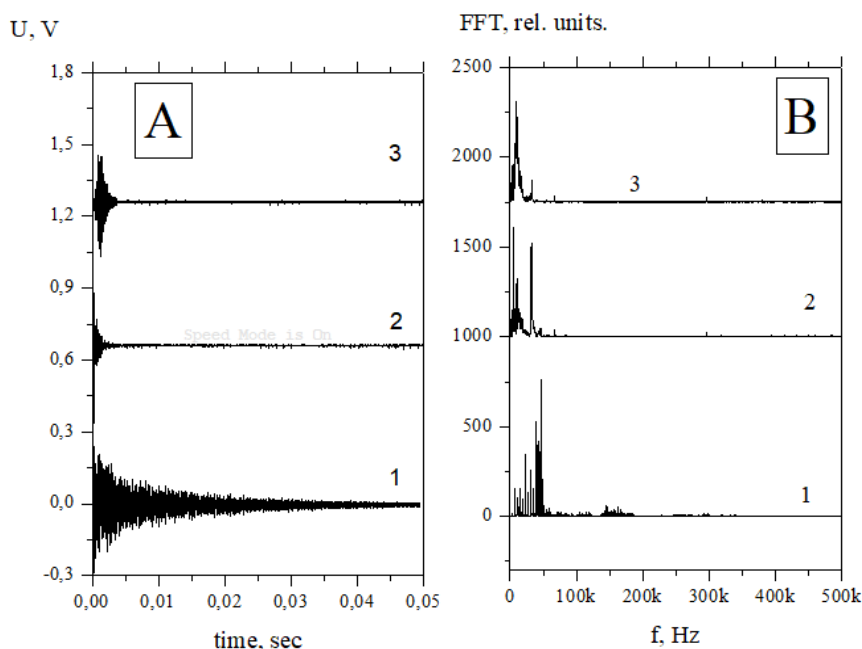


Рисунок 2 – Пример модального анализа АЭ датчика: а) Регистрируемый сигнал на брусках из стали (1), ПММА (2) и POM (3)

б) Преобразование Фурье этих сигналов.

На рис. 3а в логарифмических координатах показан пример преобразования Фурье спектра, полученного на стальном бруске в широком диапазоне частот. Этот

спектр отражает полосу пропускания датчика, который охватывает диапазон до 500 kHz при заданном уровне чувствительности. На рис. 3б показан тот-же спектр в низкочастотной области (до 60 kHz). Для случая стержней, длина которых значительно превышает их поперечный размер существуют аналитические решения упрощенных одномерных волновых уравнений вида [6]:

$$\frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} - \frac{\rho}{E} \cdot \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

где u_z - деформация вдоль оси стержня, ρ - плотность, E - модуль упругости. Для продольных колебаний решения для частот имеют следующий вид:

$$\nu = \left(\frac{E}{\rho}\right)^{1/2} \frac{n}{2L} \quad (3)$$

где L –длина стержня, E – модуль Юнга, ρ - плотность.

Это решение предсказывает равномерное распределение собственных частот колебаний в частотной области (частоты кратны целому числу n). Эксперимент, однако, показывает (рис. 3б), что равномерность распределения регистрируемых частот соблюдается лишь для частот до ~ 40 kHz. При более высоких частотах интервал между соседними частотами сокращается, их мощность резко снижается. Изменения в интервалах между частотами указывает на отклонения картины распространения колебаний в реальной геометрии эксперимента по сравнению с одномерной моделью. Для учета реальной геометрии стального бруска был применен метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в программе Comsol Multiphysics 6.2. Брусок разбивался на тетраэдрические элементы линейного размера ~ 1 mm. Для поиска собственных частот был использован блок решений волновых уравнений Eigenfrequency. На рис. 3б вертикальными серыми линиями показаны определенные методом МКЭ собственные частоты. Для расчета использовано стандартное значение модуля Юнга стали: 215 GPa, коэффициент Пуассона 0.3 и плотность 7750 kg/m³.

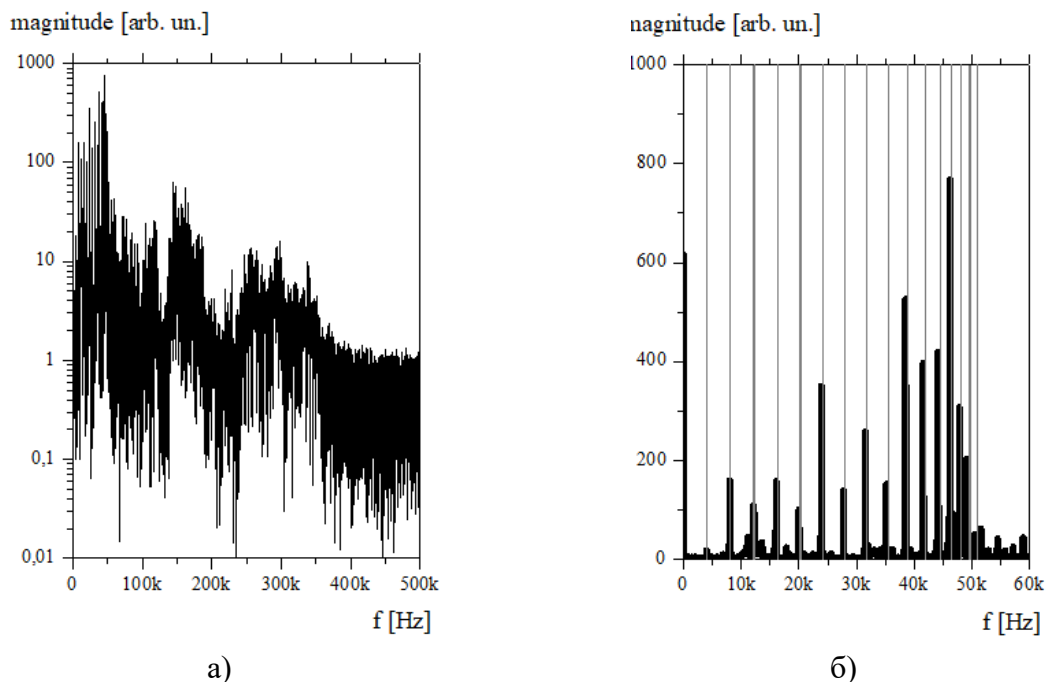


Рисунок 3 – а) Фурье преобразование спектра стального бруска в широком диапазоне частот, б) Тот же спектр в низкочастотной области. Вертикальные серые стрелки показывают собственные частоты продольных колебаний, определенные методом МКЭ (см. текст)

Видно, что численный метод хорошо описывает эксперименты на брусках конечных размеров как ниже, так и выше ~ 40 kHz в ультразвуковой области. Отметим, что генерация колебаний в перпендикулярном длинной грани бруска направлению и регистрация АЭ сигналов на боковых гранях бруска (не показано), приводит к существенным изменениям в положении и интенсивности пиков Фурье преобразования, что может отражать, например, доминирование в спектре изгибных мод колебаний в этом случае возбуждения. Очевидно, таким образом, что использованный в работе датчик позволяет проводить надежную количественную характеризацию колебательных процессов в изучаемых объектах.

На Рис. 4а показан типичный вид синхронных измерений силы трения и модуля сигнала АЭ в паре ПОМ-ПОМ в зависимости от пути трения. Видно, что при трении происходит нарастание силы трения и, с определенной задержкой, возникают сигналы АЭ. В случае пары ПОМ-ПЭЭК и пары трения ПТФЭ-ПТФЭ во всем использованном диапазоне мощности трения ($W = F_{fr} \cdot V$). АЭ сигналы были ниже порога чувствительности. На Рис. 4б показаны зависимости работы, необходимой для перехода силы трения $F_{fr}^{min} \rightarrow F_{fr}^{max}$ (принцип построения показан вертикальной стрелкой 1 на рис. 4а) и работы, необходимой для инициирования формирования АЭ сигналов (вертикальная стрелка 2) от величины произведения F_n и V (величина пропорциональная мощности трения с точностью до коэффициента трения). Видно, что при росте мощности трения работа трения, необходимая для инициирования перехода $F_{fr}^{min} \rightarrow F_{fr}^{max}$ расчетной силы трения практически не меняется. Работа, необходимая для инициирования возникновения сигналов эмиссии снижается при росте мощности трения, приближаясь к работе необходимой для перехода, при величине мощности ~ 0.3 W. Это может указывать на термоактивированную природу процесса изнашивания, например, по механизму взаимопроникновения макромолекул в паре ПОМ-ПОМ [2].

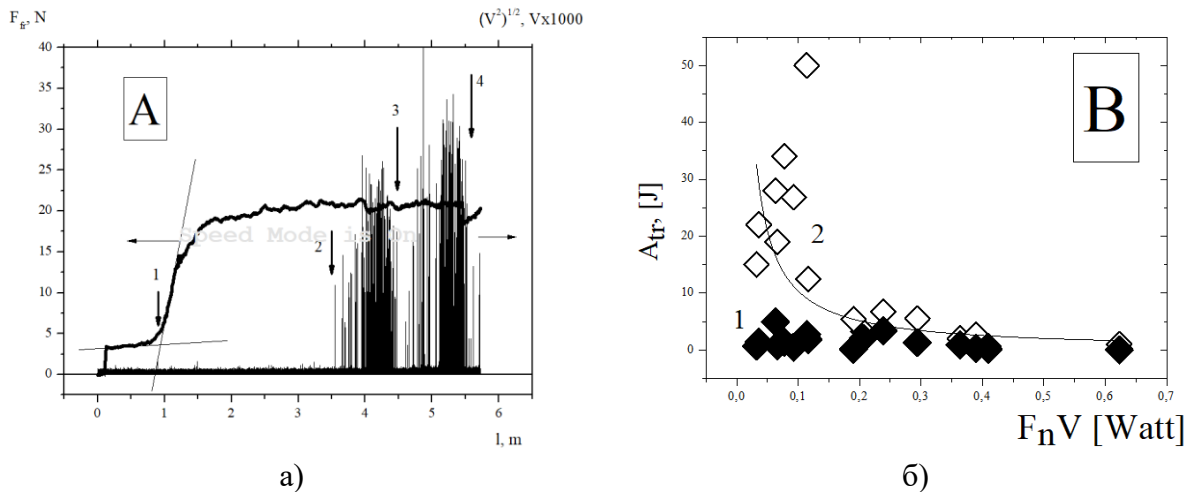


Рисунок 4 – а) Типичная синхронная регистрация силы трения и сигналов пьезодатчика (для удобства рассмотрения сигнал датчика увеличен в 1000 раз), скорость скольжения $V=0.00519$ m/sec, $F_n=72$ N, шаг регистрации 0.4 ms, б) Зависимость работы трения при переходе силы трения $F_{frmin} \rightarrow F_{frmax}$ (1) и работы, необходимой для инициирования возникновения сигналов эмиссии (2) в паре ПОМ-ПОМ от мощности трения.

Отметим, что на рисунке 4а показан эксперимент с минимальной скоростью скольжения, использованной до сих пор в наших исследованиях ($V \sim 0.0016$ m/s). При малых скоростях отдельные сигналы эмиссии наиболее разрешены во временной шкале. Рост скорости скольжения приводит к увеличению плотности

сигналов во временной шкале (примеры выходят за рамки статьи), что разумно объяснимо ростом частоты актов разрушения поверхности при изнашивании. Можно предположить, что выход интенсивности сигналов на насыщение обусловлен исчерпанием доступной для разрушения (износа) поверхности и/или изменением ее структурного состояния, например, обусловленным достижением температуры плавления полимера на границе раздела (табл.1). Интересно отметить, что резкие спады в интенсивности сигналов эмиссии (вертикальные стрелки 3, 4, рис. 4а) хорошо коррелируют со спадами силы трения, что может быть использовано для разработки количественных оценок мощности трения, необходимой для реализации эмиссионных процессов.

Спектры эмиссии с меньшими шагами регистрации по времени позволяют анализировать частотные характеристики отдельных событий эмиссии. На рис. 5а показан пример эволюции спектров в одном опыте при росте времени трения. Видно, что в самом начале трения (до перехода $F_{fr}^{min} \rightarrow F_{fr}^{max}$) при выбранном пороге чувствительности сигналы эмиссии не регистрируются (нижний спектр). При увеличении времени трения и росте расчетной силы трения происходит возникновение сигналов, которые постепенно “заливают” весь интервал регистрации. Это разумно объяснимо тем, что с ростом времени трения растет число актов трансформации поверхности полимера, например, ее разрушения, приводящих к изнашиванию полимера и возникновению сигналов эмиссии. Обратим внимание (рис. 5б), что рост времени трения приводит в основном к нарастанию интенсивности спектра и к некоторому изменению спектрального состава спектров в высокочастотной области (100-400kHz). Можно предположить, что изменение спектрального состава отражает конкретный механизм разрушения, что, однако, требует более детальных количественных исследований. При более низких частотах спектры содержат составляющие, которые, как показали специальные эксперименты, входят в колебательный спектр установки как целого и поэтому не анализируются в данной работе.

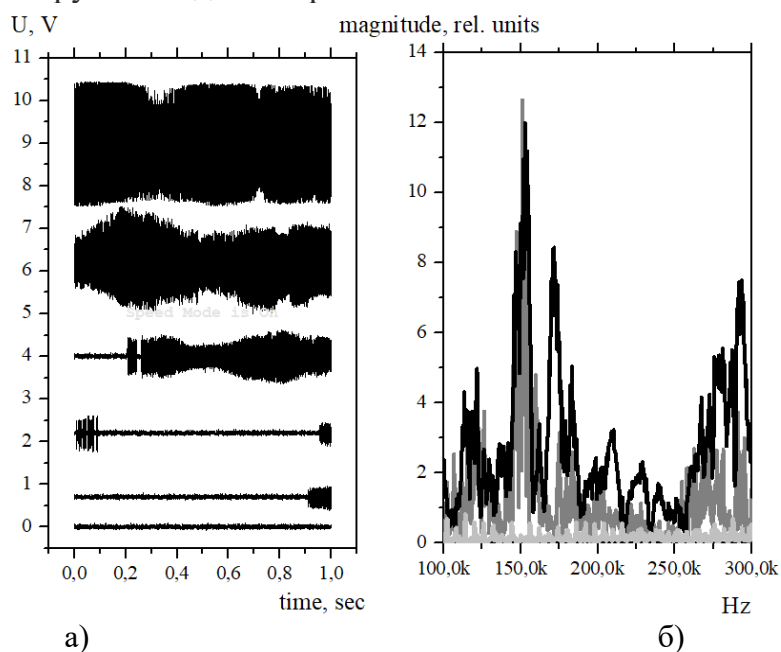


Рисунок 5 –а) Типичное изменение сигнала датчика при увеличении времени трения, б) Преобразование Фурье сигналов. Показаны спектры первого сигнала снизу Рис. 5а (светлая малоинтенсивная кривая), четвертого снизу (более темная серая кривая) и верхнего (темная кривая), то есть более темный спектр

соответствует большому времени трения. Скорость скольжения $V=0.009$ m/sec,
 $F_n=22$ N, шаг регистрации 100 ns

В настоящее время проводятся более детальные исследования обсужденных явлений с использованием описанных выше инструментов.

Заключение

Разработан прибор для синхронной регистрации сигналов акустической эмиссии и силы трения в одном трибологическом эксперименте. Показано, что прибор дает новую количественную информацию о процессе изнашивания. В частности, метод позволяет определять работу трения необходимую для инициирования процесса изнашивания, приводящего к генерации колебаний вплоть до ультразвуковых частот, определять частотные характеристики сигналов и проводить временной анализ характера их накопления при разных величинах мощности трения. Разработанная установка может быть полезна для исследования широкого круга пар трения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец, Трение, смазка и износ: физические основы и технические приложения трибологии, Москва, Физматлит, 2007, стр. 387
2. Pozdnyakov A.O., Syanshun L., Sedakova E.B., Molecular Mechanisms of Polyoxymethylene Wear. J. Frict. Wear. 45, 24–31 (2024) DOI: 10.3103/S106836662470004110.1007/s11249-023-01692-w.
3. Поздняков А.О., Образование продуктов деструкции макромолекул при трении полимера по полимеру, 2023, Письма ЖТФ, т.49, №10, стр.17-20 DOI: 10.21883/PJTF.2023.10.55428.19537
4. Козырев Ю.П., Седакова Е.Б. Особенности частотного спектра сигналов акустической эмиссии при износе политетрафторэтилена, Проблемы машиностроения и надежности машин. 2005. N 6 . С. 115-119.
5. T.A Stolarski, Friction in a pin-on-disc configuration, Mechanism and Machine Theory, Volume 24, Issue 5, 1989, Pages 373-381, DOI: doi.org/10.1016/0094-114X(89)90067-0.
6. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Теоретическая физика, Теория упругости 4-е изд., испр. -М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. - 248 с. (т. VII)

A.O. Pozdnyakov^{1,2}, E.B. Sedakova

¹Ioffe Institute,
Saint Petersburg, Russia, ao.pozd@mail.ioffe.ru
²IPME RAS, St. Petersburg, Russia

DEVICE TO STUDY SOUND EMISSION UPON FRICTION

Abstract

The authors describe a method for synchronous recording of oscillations and friction force in polymer-polymer friction pairs. The method is illustrated using the example of polyoxymethylene (POM)-POM and POM-polyetheretherketone (PEEK) friction pairs.

It is shown that the method can be informative for determining the level of friction work required to initiate polymer wear processes leading to oscillation generation. A possible relation of sound generation processes to the nature of friction.

Key words: friction, wear, polymer, vibration, ultrasound.