

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРИБОКОНТАКТЕ ПРИ ИЗНАШИВАНИИ

*Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики*

В данной работе рассматривается решение тепловой задачи при износе, вопросы, связанные с дискретностью контакта в трибосопряжении, изменение свойств материала, изменением условий работы во времени. Основным индикатором происходящих процессов является температура. В данной работе подробно рассмотрена измерительная система для контроля температуры при износе. Данная задача актуальна в различных фрикционных механизмах и системах.

Ключевые слова: теплопроводность, изнашивание, терморезистор, приработка, равновесная шероховатость.

Техника продолжает совершенствоваться все более высокими темпами. Продолжаются тенденции к уменьшению энергопотреблению, автоматизации, безопасности и ресурсоемкости. В настоящее время очень быстро появляются новые материалы, имеющие разнообразные свойства и применения. Многие из них находят место в трибологии и триботехнике, где они заменяют дорогие или менее износостойкие для длительной работы материалы. Следовательно, способы исследования и расчета также продолжают развиваться. Внедряются новые типы износостойких материалов, смазочных композиций, чувствительных датчиков, высокоточные измерительные системы, систем сбора и обработки данных. Современная электроника позволяет создавать недорогие системы контроля, работающие в режиме реального времени. Заключительной системой является система принятия решений обрабатывающая множество входящих данных, на основе предварительно найденных критериев.

Современная диагностика трибосопряжений основана на контроле температуры и вибраций отдельных узлов. Использование средств мониторинга позволяет нормализовать работу трибопары, исключив режимы интенсивного износа отдельных частей механизма сократить время приработки и существенно продлить ресурс.

Исследование работоспособности трибосопряжений начинается с моделирования и постановки масштабного эксперимента. Экспериментальное исследование имеет решающую роль в виду сложности описания происходящих процессов при трении. В общепринятой практике применяются различные виды испытаний. В данной работе исследовалась схема «палец» - «диск» и рассматривались варианты трибопар сухого трения разнородных материалов применяемые в реальных узлах трения. Эксперимент проводился для шести различных видов материалов при разных режимах работы нагружение, скорость. Проводились замеры температуры неподвижного образца «палец» и температуры окружающей среды.

Температура поверхности трущихся деталей значительно выше именно в точках контакта, а измерения производится объемной температуры тел. Современные датчики позволяют выполнять измерения в широком диапазоне температур от -250 до 4000 C^0 , как бесконтактным, так и контактными методами. В триботехнике для контроля большинства механизмов при работе в нормальных условиях, измеряемая температура находится в пределах от -50 до 200 C^0 . В случаях значительного износа, повышенных температур наблюдается повышение температуры до 500 C^0 . Наиболее подходящими по быстродействию, чувствительности в данных диапазонах являются терморезисторы и термопары. Применимость хорошо отлаженных методов на основе естественной термопары двух металлов не представляется возможным для широкого спектра исследований. Измерение с помощью термопары имеет некоторые ограничения по

соотношению сигнал-шум. Время отклика для терморезистивных датчиков составляет около 0,5 секунд, точность 0.5 °С в диапазоне 0 до 100 °С и 3 °С диапазоне 400 до 540 °С. Основные характеристики представлены далее в таблице 1.

Таблица 1

Применяемые датчики температуры

Датчик температуры	AD TMP 35 опорный (установлен на плате сбора данных)	HEL-707-T-0-12-00 (интегрирован в образец)
Минимальная измеряемая температура, С	0	-200
Максимальная измеряемая температура, С	125	540
Тип датчика	кремниевый	платиновый терморезистор
Точность, °С	1.0-2.0	0.3-3.0
Линейность, °С	0.5	0.3
Время отклика, с	5	0,05вода/3,0 воздух
Измеряемая среда:	Газ/ Поверхность	Поверхность/жидкость
Выходной сигнал:	U, 0-1.25 В	Ом, 0-3500
Корпус:	ТО92	Цилиндр 2*4 мм
Цена 15.03.2012	3 руб.(megachip.ru 12.03.2012)	1200 руб.

Важнейшим параметром терморезистивного датчика является его характеристика преобразования. На практике эта функция очень точно аппроксимируется уравнением Каллендара-Ван Дусена (1), на основе A , B и C - константы, полученные из величин сопротивления датчика при температурах 0°С, 100°С и 260°С.

$$RT = R0 + (AT + BT^2 - 100CT^3 + CT^4) \quad (1)$$

RT - функция сопротивления датчика (W) от температуры (°С);

$R0$ - сопротивление датчика W при °С;

T - температура ($^{\circ}\text{C}$).

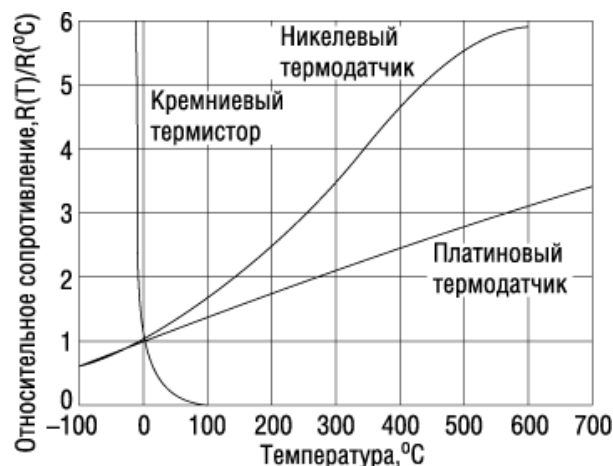


Рис 1. Линейность выходной характеристики датчиков температуры

Платина является прецизионным металлом с очень стабильной и близкой к линейной зависимостью сопротивления от температуры. Несмотря на несколько меньшую крутизну характеристики преобразования по сравнению с термосопротивлениями на основе других металлов [4].

Для получения данных о температуре во время эксперимента непосредственно на плату обработки сигналов, в данном случае были применены датчики TMP35 фирмы Analog Devices в исполнении TO-92 (тип корпуса).

Обязательным элементом измерительной системы является аналоговая схема обработки сигнала, которая используется для стабилизации напряжения питания, усиления полезного сигнала, компенсации наводок и фильтрации данных. Была разработана схема на основе прецизионных операционных усилителей (AD8554, OP297) для усиления сигнала и регулируемых стабилизаторах питания (MIC 2950/51). Для оцифровки, визуализации сигнала был применен блок сбора данных E14-440 фирмы Л-КАРД, а также программа визуализации L-Graph 2. Данный блок сбора данных внесен в Госреестр средств измерений. Программа сбора данных L-Graph 2 позволяет синхронизировать данные, записывать в удобный формат для последующей обработки и т.д.

Моделирование процесса теплопередачи в узле трения

На основе уравнения теплопроводности для нестационарного режима трения производится построение модели распределения тепловых потоков в материале. Первоначально для данной задачи была использована программа COSMOS Solid Works. Адаптивная модель описывает собой распространение тепловых потоков от источника тепла (поверхность трения) по объемам тел (диск, стержень «палец»). Мощность теплового источника определяется из условия, что 95% процентов мощности рассеиваемой при трении имеет тепловую природу. Данное предположение подтверждено экспериментальным исследованием по калориметрии для разных материалов лежит в диапазоне от 75% до 99% [3].

Трение между поверхностями приводит к повышению температуры (тепловая мощность), на поверхности трения, тепловые волны, распространяясь вглубь деталей, нагревают всю конструкцию. Измерение температуры непосредственно на поверхности практически невозможно в виду сложности механизма трения, датчик температуры устанавливается на заданном расстоянии 3мм от контактирующих поверхностей, что позволяет напрямую получать данные о средней температуре поверхности.

При изменении температуры материала изменяются его теплофизические свойства, что влечет за собой изменение:

1. Физических свойств материала твердость, модуль упругости и модуль сдвига.
2. Свойств поверхностного слоя энергии активации, вязкости смазочных композиций, адгезионных свойств.

Прогнозирование изменения данных свойств трибосопряжения не представляется возможным для большинства механизмов. Косвенная оценка на основе измерения температуры позволяет непосредственно в процессе работы, получать данные о работе сопряжения.

Таблица 2

Теплофизические свойства исследуемых материалов

Материал	λ	ρ	c	Применение
	Вт/(м·град)	кг/м ³	Дж/(кг·град)	
ЛС59-1	104,00	8400,00	370,00	зубчатые колеса, втулки
Ф4	0,25	2100,00	1,04	втулки, вкладыши
Д16	130,00	2770,00	0,92	корпуса, оси
Ст30ХГС	37,00	7850,00	490,00	оси, зубчатые колеса

Примечание: λ - коэффициент теплопроводности, ρ - плотность материала, c - удельная теплоемкость материала.

Для решения контактной задачи, определения коэффициентов разделения тепловых потоков, была использована формула Шарона (2).

$$\chi_1 = \frac{\sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2}}{\sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1} + \sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2}}; \quad (2)$$

где χ_1 - коэффициент разделения тепловых потоков.

Данная формула не учитывает объемных свойств контактируемых тел и может использоваться для незначительных разогревов первоначального распределения теплоты.

Для нахождения средней температуры поверхности воспользуемся уравнением Дюамеля, его интегральная форма уравнения позволяет произвести оценку на основе энергии выделившейся при взаимодействии q_1 (Дж).

$$T = T_0 + \frac{2q_1 \sqrt{t}}{\sqrt{\pi \lambda_1 c_1 \rho_1}}; \quad (3)$$

где T_0 , T - начальная и конечная средние температуры поверхности;

Параметр $E = NfVt$; (Дж) = (Н)(м/с)(с) определяет энергию при трении, в общем случае коэффициент трения очень чувствителен к изменению

условий трения, поэтому расчет энергии трения через коэффициент трения может быть использован только для ориентировочных расчетов [3].

В первом приближении тепловые процессы можно считать стационарными, где температурное поле не меняется во времени, например судовых дизелей, работающих непрерывно несколько суток. Однако большинство узлов трения работают в нестационарных режимах, что связано с изменением температурного поля как по времени, так и изменением энтальпии (нагрев или охлаждение). Уравнение теплопроводности в случае Фурье-Кирхгофа (4).

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T; \quad (4)$$

$a = \lambda / (c\rho)$ (m^2 / c) - температуропроводность характеризующая скорость выравнивания температуры тела в неравновесных тепловых процессах, ∇ - Оператор Лапласа, записанный в прямоугольной, цилиндрической, сферической системах координат. Данное уравнение устанавливает связь между температурой, временем и координатами.

В задачах трения и износа для решения задачи теплопроводности используется граничное условие 3-го рода (5):

$$q_1 = \alpha_{mp}(T - T_0), \quad \alpha_{mp} = (1 - \chi_1) Nf / (T_k - T_0); \quad (5)$$

где α_{mp} - коэффициент теплоотдачи при трении, характеризующий интенсивность отдачи тепла, связывающий параметры трения и теплофизические свойства материала [1], T_k конечная температура нагрева.

Таким образом, решение задачи будет зависеть от формы тела, характерного размера L , теплофизических свойств, начального условия \mathcal{G}_0 , условий теплообмена

Для тел одинаковой формы получаем $\mathcal{G} = \mathcal{G}(x, y, z, \tau, L, a_{mp}, \mathcal{G}_0, \chi_1)$

Решение данной задачи в виду ее сложности находится из нахождения критериев подобия, определяемые через соотношения величин входящих в уравнение теплопроводности:

Критерий Пекле (6) определяет скорость перемещения тела в теплофизических расчетах, скорость перемещения быстродвижущегося источника превышает скорость распространения теплоты в данном теле.

$$Pe = \frac{V(m/c)l(m)}{a(m^2/c)}; \quad (6)$$

где V - скорость движущегося источника;

По скорости источники различаются на неподвижные ($Pe=0$) и быстродвижущиеся ($Pe=10$).

$$Fo = \frac{a(m^2/c)\tau(c)}{L^2(m^2)}; \quad (7)$$

Критерий тепловой гомохромности Фурье, характеризующий соотношение между временем протекания процесса и временем распространения температурной волны. По времени функционирования источники можно разделить на мгновенные ($Fo \rightarrow 0$), периодические и при предельных значениях переходящие в стационарные.

$Bi = \frac{\alpha L}{\lambda}$; где α - коэффициент теплоотдачи. Критерий Био, по физическому смыслу характеризует отношение термического сопротивления теплопроводности стенки L/λ к термическому сопротивлению теплоотдачи на границе между телом и окружающей средой.

Фрикционный аналог критерия Био является безразмерным комплексом величин и определяет отношение интенсивности тепловыделения при трении к интенсивности отвода тепла вглубь трущихся тел путем теплопроводности.

$$Bi_{mp} = \frac{\alpha_{mp}\sqrt{at}}{(T_K - T_0)}; \quad (8)$$

Понятие о фундаментальном критерии Био является фундаментальным при исследовании фрикционного разогрева при сухом трении и нелинейной зависимости силы трения от температуры [1]. Здесь имеется некоторое расхождение по сравнению с [1] T_K - конечная установившаяся температура тела, а не $T_{пл}$ температура плавления.

Постановка эксперимента

Для проведения исследований была выбрана стандартная схема испытания. Данный эксперимент можно проводить на прикладном не специализированном оборудовании. В стандартную схему испытания внесены изменения. Держатель крепления контр пары - «пальца», подпружинен в двух плоскостях, что соответствует опоре с упругим основанием.

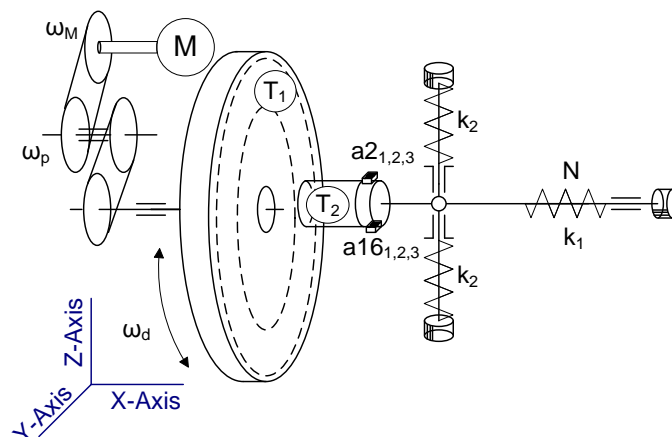


Рис 2. Принципиальная схема устройства испытания материалов на износостойкость.

Условные обозначения ω_M , ω_p , ω_d - скорости вращения привода, шкива, диска (м/с), T_1 , T_2 - средняя температура поверхности диска и образца «пальца», k_1 , k_2 - коэффициент жесткости пружин, N - сила нагружения (Н).

Образцы предварительно отшлифованы, измерена шероховатость поверхности. Для диска измерения проводились по радиусу от центра к

краю. Для контр пары «пальца» в двух пересекающихся направлениях, значения в разных направлениях отличаются на 6% для величин Ra, Rz, Rq. Основным параметром оценки величины шероховатости поверхности служит Rq (мкм^2) – средне квадратичное отклонение профиля на базовой длине относительно средней линии.

Таблица 3

Свойства контактирующих поверхностей

Комбинация материалов		Коэффициент трения, данные таблиц [4]	Нагрузка, Н	Площадь контакта, мм^2	Биение поверхности диска, мкм	Ra, мкм	Rq, мкм^2
Д16	ЛС-59-1	0.25	22	63.1	15	0.76	1.16
						0.95	1.21
Ф4	ЛС-59-1	0.04	22	64	10	5.01	6.06
						0.95	1.21
Ст30Х ГС	ЛС-59-1	0.2	22	64	25	1.34	1.68
						0.95	1.21

Постоянная величина нагружения в контакте, осуществляется посредством пружины с коэффициентом жесткости k_1 на определенной длине. Зная жесткость пружины, число витков пересчитывается усилие, которое создается на определенной длине. Длина пружины регулируется построчным винтом, а для калибровки силы нагружения используется тензодатчик с выходным сопротивлением $350 \pm 30 \text{Н}$ фирмы ExactSensor. Рассмотрим режим длительного износа поверхностей различных материалов, во времени и изменение объемной температуры в процессе эксперимента.

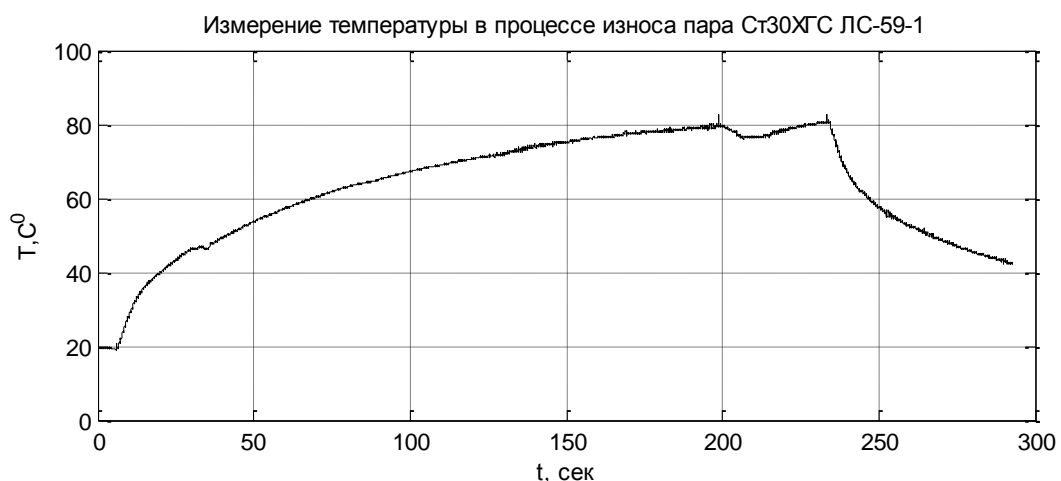


Рис 3. Измерение температуры образца на всем периоде износа трущихся поверхностей, начальная температура различна, график имеет наклон до середины, и резкий спад в конце, соответствует циклу нагрева и охлаждения.

Различие линий на графиках происходит из-за различия физических свойств материалов, особенностей процесса приработки. Начальный отрезок экспериментальных данных напрямую свидетельствует о различии при выделении энергии в виде тепла для разных комбинаций материалов. Во всех трех экспериментах использовалась одна и та же контр пара из латуни ЛС-59-1, следовательно, изменение температуры поверхностного слоя зависело только от параметров фрикционного контакта.

Таблица 4

Расчетные значения теплофизических критериев

Комбинация материалов		Теплофизический критерии			
		Pe	Fo	Bio	$Biof$
Д16	ЛС-59-1	$8 \cdot 10^3$	$1,26 \cdot 10^{-4}$	0,058	$6,5 \cdot 10^{-5}$
Ф;	ЛС-59-1	$4 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{-10}$	0,12	$1,8 \cdot 10^{-6}$
Ст30ХГС	ЛС-59-1	$4 \cdot 10^7$	$8 \cdot 10^{-8}$	0,26	$4 \cdot 10^{-5}$

Для данного эксперимента на основе модели были найдены критерии характеризующие контакт поверхностей трения. Проведен анализ способов, измерения, температуры, выбран оптимальный с учетом множества факторов возникающих при трении, износе, работающий в условиях вибрации, загрязнений и др. Получено решение нестационарной задачи теплопроводности при коротких пусках для различных сопряжений пар трения. Данное решение совместно с измерительной системой может быть использовано для разработки системы мониторинга трибосопряжений в машинах и механизмах. На основе датчиков температуры и комплексной системы сбора и обработки данных.

Литература:

1. Амосов А.П. Элементарные теплофизические модели трения: Научный журнал «Известия Самарского научного центра РАН». – М., 2011. – т.13 №4 656-670 с.
2. Современная трибология: Итоги и перспективы./Отв. Ред. К.В.Фролов, - М.: Изд-во ЛКИ,. 2008, с. 476.
3. Махамов К.Х. Расчет износостойкости машин. Учебное пособие. Ташкент: ТашГТУ, 2002. - 144 с.
4. Справочник по триботехнике в 3-х томах. Том 2 Автор: Хебда М., Чичинадзе А.В. Издательство: Машиностроение, 1990.