

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ ВХОДЯЩИХ В МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФАКТОРОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ

Войтов В.А., д.т.н., проф., Захарченко М.Б., асп.

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко

В статье выполнена экспериментальная оценка степени влияния входящих в математические модели факторов на процесс трения и изнашивания материалов трибосистем в условиях граничной смазки. Установлено, что на величину скорости изнашивания и коэффициента трения, в первую очередь, влияют параметры шероховатости, а затем трибологические свойства смазочной среды, эксплуатационные параметры и, в последнюю очередь, структура сопрягаемых материалов

Актуальность проблемы. В последнее время активно развиваются методы расчета и моделирования процессов трения и изнашивания в трибосистемах машин и механизмов, что позволяет значительно снизить затраты в процессе проектирования и доводки новых конструкций. Трудности, которые возникают при разработке таких моделей, связаны с выбором параметров, которые влияют на исследуемый процесс, в основном это многопараметрические задачи.

Анализ публикаций, посвященных данной проблеме. При разработке моделей по расчету износа и прогнозированию ресурса используют в основном вероятностные подходы [1 – 5]. Построение таких моделей базируется на расчетах характеристик контакта и методах описания шероховатости поверхности [6].

В работе [7] дается анализ современного состояния методов расчета износа и прогнозирования ресурса и делается вывод, что аналитические методы не позволяют учитывать динамику изменения параметров режимов работы контакта, а перспективными представляются численные методы.

В работе [8] предложено описывать износ массивом векторов вероятностей величин износа дискретных точек поверхности, называемых «трибоэлементами». Трибоэлемент моделируется нестационарными случайными функциями марковского типа, а износ оценивается математическим ожиданием вероятности нахождения трибоэлементов в некотором состоянии. Форма изношенной поверхности определяется с помощью кубической сплайн-аппроксимации математических ожиданий износа в точках расположения трибоэлементов.

Авторами работы [9] разработана методика математического моделирования скорости работы диссипации трибоэлементов в трибосистеме,

которая позволяет определять «загруженность» трибоэлементов, а, следовательно, и моделировать скорость изнашивания. Как следует из работы, это многофакторная задача, которая требует ранжирования факторов, что позволит повысить точность моделирования.

Цель работы. Выполнить экспериментальную оценку степени влияния входящих в математические модели факторов на процесс трения и изнашивания материалов трибосистем в условиях граничной смазки.

Методический подход в проведении исследований. Анализ математических моделей для моделирования скорости изнашивания и коэффициента трения, который приведен в анализе публикаций, посвященных данной проблеме, включает в себя следующие входные факторы.

1. Параметр шероховатости поверхности трения – среднее арифметическое отклонение точек профиля, Ra , мкм.

2. Параметр шероховатости поверхности трения – средний шаг неровностей по средней линии профиля, Sm , мм.

3. Физико-механические и реологические свойства контактирующих материалов: модуль упругости; коэффициент Пуассона; внутреннее трение структуры материалов трибоэлементов. На основании результатов, которые получены в работе [9], структуру материалов подвижных и неподвижных трибоэлементов можно учитывать как произведение коэффициентов затухания ультразвуковых колебаний в материале трибоэлементов, δ , безразмерная величина.

4. Трибологические свойства смазочной среды, которые представлены в виде удельной работы изнашивания, E_y , Дж/м³.

4. Особенности конструкции трибосистемы, которые оцениваются размерами меньшей площади трения одного из трибоэлементов, $F_{тр}$, м².

6. Эксплуатационный параметр – нагрузка на трибосистему, N , Н.

7. Эксплуатационный параметр – скорость скольжения, v , м/с.

Перечисленные семь факторов влияния на процесс трения и изнашивания представим в виде таблицы 1, где указаны уровни варьирования факторов.

Таблица 1 – Значения факторов и уровни варьирования

Обозначение	Факторы						
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
Код							
Параметр	Ra , мкм	Sm , мм	δ	E_y , Дж/м ³	$F_{тр}$, м ²	N , Н	v
Нижний уровень « - »	0,2	0,4	6990736	$1,8 \cdot 10^{14}$	$6 \cdot 10^{-5}$	400	0,3
Верхний уровень « + »	0,4	0,8	9238136	$3,2 \cdot 10^{14}$	$12 \cdot 10^{-5}$	800	0,6

Результаты исследований. Применяя план-матрицу планирования 2⁷, получен план проведения экспериментальных исследований, табл. 2.

Экспериментальные исследования проводились с применением

кинематической схемы испытаний «кольцо – кольцо» с коэффициентом взаимного перекрытия 0,2, что соответствует величине меньшей площади трения $F_{mp} = 6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$, а также с коэффициентом взаимного перекрытия 0,4, что соответствует $F_{tp} = 12 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$.

Таблица 2 – План проведения эксперимента

№ n/n	Ra, мкм	Sm, мм	δ	$E_y, \text{Дж/м}^3$	$F_{TP}, \text{м}^2$	N, Н	v, м/с
1	0,4	0,8	9238136	$3,2 \cdot 10^{14}$	$12 \cdot 10^{-5}$	800	0,6
2	0,4	0,4	6990736	$1,8 \cdot 10^{14}$	$6 \cdot 10^{-5}$	800	0,6
3	0,2	0,4	9238136	$3,2 \cdot 10^{14}$	$6 \cdot 10^{-5}$	400	0,6
4	0,2	0,8	6990736	$1,8 \cdot 10^{14}$	$12 \cdot 10^{-5}$	400	0,6
5	0,2	0,4	6990736	$3,2 \cdot 10^{14}$	$12 \cdot 10^{-5}$	800	0,3
6	0,2	0,8	9238136	$1,8 \cdot 10^{14}$	$6 \cdot 10^{-5}$	800	0,3
7	0,4	0,8	6990736	$3,2 \cdot 10^{14}$	$6 \cdot 10^{-5}$	400	0,3
8	0,4	0,4	9238136	$1,8 \cdot 10^{14}$	$12 \cdot 10^{-5}$	400	0,3

В качестве смазочной среды были выбраны: гидравлическое масло МГП-10, с параметром $E_y = 1,8 \cdot 10^{14}$ и моторное масло М-10Г_{2к}, с параметром $E_y = 3,2 \cdot 10^{14} \text{ Дж/м}^3$.

Материалами для трибоэлементов были выбраны:

- «сталь 40Х + сталь 40Х», с параметром $\delta = 6990736$;
- «сталь 40Х + Бр. АЖ 9-4», с параметром $\delta = 9238136$.

Таблица 3 – Результаты моделирования и экспериментальных исследований

№ эксперимента	$\bar{I}_s, \text{м}^3/\text{ч}$	$\bar{I}_T, \text{м}^3/\text{ч}$	Ошибка, I, %	\bar{f}_s	f_T	Ошибка, f, %
1	$8,5 \cdot 10^{-10}$	$9,00 \cdot 10^{-10}$	5,88	0,055	0,058	5,45
2	$80,0 \cdot 10^{-10}$	$83,18 \cdot 10^{-10}$	3,97	0,17	0,185	8,82
3	$7,0 \cdot 10^{-10}$	$7,35 \cdot 10^{-10}$	5,0	0,055	0,058	5,45
4	$6,5 \cdot 10^{-10}$	$6,92 \cdot 10^{-10}$	6,46	0,019	0,020	5,26
5	$7,5 \cdot 10^{-10}$	$7,84 \cdot 10^{-10}$	4,53	0,065	0,067	3,07
6	$6,2 \cdot 10^{-10}$	$6,72 \cdot 10^{-10}$	8,38	0,017	0,018	5,88
7	$6,3 \cdot 10^{-10}$	$6,86 \cdot 10^{-10}$	8,88	0,065	0,067	3,07
8	$10,0 \cdot 10^{-10}$	$10,47 \cdot 10^{-10}$	4,7	0,17	0,18	5,88

Результаты экспериментальных исследований представлены в виде среднеарифметического значения скорости изнашивания $\bar{I}_3, \text{м}^3/\text{ч}$ и коэффициента трения \bar{f}_3 по результатам трех повторов экспериментов.

Рядом с экспериментальными значениями представлены расчетные значения указанных выше параметров по формулам работы [9], а также ошибка моделирования по каждой серии экспериментов.

В процессе обработки результатов экспериментов были получены два регрессионных уравнения:

- для скорости изнашивания:

$$I_3 = 1,599 \cdot 10^{-9}x_1 - 1,563 \cdot 10^{-9}x_2 - 1,362 \cdot 10^{-9}x_3 - 1,492 \cdot 10^{-9}x_4 - 1,338 \cdot 10^{-9}x_5 + 1,462 \cdot 10^{-9}x_6 + 1,451 \cdot 10^{-9}x_7 + 2,134 \cdot 10^{-9} \quad ;(1)$$

- для коэффициента трения:

$$f_3 = 8,05 \cdot 10^{-2}x_1 - 8,05 \cdot 10^{-2}x_2 - 5,00 \cdot 10^{-3}x_3 - 3,7 \cdot 10^{-2}x_4 + 5,00 \cdot 10^{-4}x_5 - 5,00 \cdot 10^{-4}x_6 - 4,00 \cdot 10^{-3}x_7 + 0,104. \quad (2)$$

Уравнение (1) и (2) получены не для расчета и прогнозирования значений скорости изнашивания и коэффициента трения, а для оценки степени влияния факторов на исследуемые целевые функции. Поэтому уравнения приведены в кодированных значениях и имеют первую степень факторов, т. к. анализу подлежат коэффициенты, стоящие при факторах в первой степени.

Значения коэффициентов на значимость в уравнениях проверены по критерию Стьюдента, адекватность уравнений экспериментальным данным по критерию Фишера, а воспроизводимость и повторяемость результатов в процессе проведения экспериментов, по критерию Кохрена.

Анализ значений коэффициентов, стоящих при кодированных факторах в первой степени позволяет проранжировать факторы $x_1 - x_7$ по степени их влияния на процесс трения и изнашивания в условиях граничной смазки.

Согласно уравнения (1) на величину скорости изнашивания, влияет параметр шероховатости Ra , затем (по убывающей) параметр шероховатости Sm . Величины данных коэффициентов отличаются незначительно, а, следовательно, и степень влияния Ra и Sm можно признать одинаковой.

На третьем месте по степени влияния находится смазочная среда, E_y , затем нагрузка N , скорость скольжения v , сочетания материалов δ и на последнем месте – размер площади трения $F_{\text{тр}}$.

Согласно уравнения (2) на величину коэффициента трения, в первую очередь и в одинаковой степени, влияют параметры шероховатости, Ra и Sm затем, на втором месте, смазочная среда E_y , на третьем месте сочетание материалов в трибосистеме δ , на четвертом скорость скольжения v , на пятом месте в одинаковой степени влияния стоят величина площади трения и нагрузка.

Из полученного рейтинга влияния факторов на процесс трения и изнашивания в условиях граничной смазки следует, что для повышения точности моделирования при применении разработанных моделей, а также при проведении экспериментов, в первую очередь необходимо контролировать

шероховатость поверхности и качество смазочной среды. Отклонение значений указанных выше параметров приведет к увеличению ошибки моделирования и разбросу результатов экспериментов при многократных повторах.

Остальные факторы в разной степени влияют на скорость изнашивания и коэффициент трения, при этом большая степень влияния присуща для коэффициента трения.

Ошибка моделирования, которая рассчитана по среднеарифметическим экспериментальным значениям и расчетным (теоретическим) значениям, не превышает 8,88 % для скорости изнашивания и 5,88 % для коэффициента трения, что является хорошим результатом при решении задач трения и изнашивания.

Выводы

1. Выполнена экспериментальная оценка степени влияния входящих в математические модели факторов на результаты моделирования. Установлено, что на величину скорости изнашивания, в первую очередь, влияют параметры шероховатости Ra и Sm , а затем трибологические свойства смазочной среды, эксплуатационные параметры и структура сопрягаемых материалов.

2. На величину коэффициента трения, в первую очередь, оказывают влияние параметры шероховатости, затем смазочная среда, структура сопрягаемых материалов и эксплуатационные параметры.

3. Полученный рейтинг влияния факторов на процесс трения и изнашивания позволяет повысить точность моделирования. Ошибка моделирования, которая рассчитана по среднеарифметическим экспериментальным значениям и расчетным (теоретическим) значениям, не превышает 8,88 % для скорости изнашивания и 5,88 % для коэффициента трения.

Список литературы

1. Кузьменко, А.Г. Влияние статистической неоднородности, размеров и кинематических условий на износ поверхностей трения [Текст] / А.Г. Кузьменко // Журн. «Трение и износ». – 1985. – Т. 6, № 3. – С. 432 - 441.
2. Тартаковский, И.Б. Корреляционное уравнение износа [Текст] / И.Б. Тартаковский // Журн. «Вестник машиностроения». – 1968. – № 2. – С. 17 - 24.
3. Бендерский, А.М. Вероятностная модель износа детали [Текст] / А.М. Бендерский // Журн. «Надежность и контроль качества». – 1970. – № 5. – С. 13 - 24.
4. Костецкий, Б.И. Марковская модель износа и прогнозирование долговечности изнашиваемых деталей [Текст] / Б.И. Костецкий, В.П. Стрельников, В.Г. Таций // Журн. «Проблемы трения и изнашивания». – 1976. – № 10. – С. 10-15.
5. Богдановф, Дж. Вероятностные модели накопления повреждений [Текст]: пер. с англ./ Дж. Богдановф, Ф. Козин. – М.: Мир, 1989. – 344 с.

6. Семенюк, Н.Ф. Средняя высота микровыступов шероховатой поверхности и плотность пятен контакта при контактировании шероховатой поверхности с гладкой [Текст] / Н.Ф. Семенюк // Журн. «Трение и износ». – 1986. – Т. 7, № 1. – С. 85 - 91.
7. Сорокатый, Р.В. Анализ современного состояния методов расчета износа и прогнозирования ресурса [Текст] / Р.В. Сорокатый // Журн. «Проблемы трибології». – 2007. – № 1. – С. 23 - 36.
8. Сорокатый, Р.В. Метод трибоэлементов [Текст] / Р.В. Сорокатый. – Хмельницький: ХНУ, 2009. – 242 с.
9. Войтов, В.А. Моделирование процессов трения и изнашивания в трибосистемах в условиях граничной смазки. Часть 1. Расчет скорости работы диссипации в трибосистеме [Текст] / В.А. Войтов, М.Б. Захарченко // Журн. «Проблемы трибології». – 2015. - № 1. – С. 114 - 122.

Анотація

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА СТУПЕНЯ ВПЛИВУ ФАКТОРІВ, ЩО ВХОДЯТЬ У МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ, НА РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕРТЯ І ЗНОШУВАННЯ

Войтов В.А., Захарченко М.Б.

У статті виконана експериментальна оцінка ступеня впливу факторів, що входять у математичні моделі, на процес тертя і зношування матеріалів трибосистем в умовах граничного мащення. Встановлено, що на величину швидкості зношування і коефіцієнта тертя, в першу чергу, впливають параметри шорсткості, а потім трибологічні властивості мастильного середовища, експлуатаційні параметри і, в останню чергу, структура сполучених матеріалів

Abstract

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE DEGREE OF INFLUENCE WITHIN THE MATHEMATICAL MODEL FACTORS ON THE RESULTS OF THE SIMULATION OF FRICTION AND WEAR

V. Vojtov, M. Zaharchenko

This article gives an experimental evaluation of the degree of influence within the mathematical model of factors on the process of friction and wear of materials tribosystems under boundary lubrication. It has been established that the value of the rate of wear and coefficient of friction, primarily affect the roughness parameters, and then the tribological properties of the lubricant and operating parameters, in the last instance, the structure of the mating materials