

В.А. Войтов, доктор технических наук, профессор

М.Б. Захарченко, аспирант

*Харьковский национальный технический университет
сельского хозяйства им. П. Василенко, г. Харьков, Украина*

КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ СОВМЕСТИМОСТИ МАТЕРИАЛОВ В ТРИБОСИСТЕМЕ

Аннотация. Обоснован и предложен критерий оценки совместимости материалов в трибосистеме между собой и смазочной средой – добротность трибосистемы. Исследована функция добротности и ее влияние на скорость изнашивания и коэффициент трения. Установлено, что величина добротности обратно пропорциональна скорости изнашивания и коэффициенту трения, а функция добротности имеет экспоненциальный характер.

Оптимальный механизм приспособляемости материалов при трении – это приобретение ими такой структуры в поверхностных слоях, которая будет препятствовать распространению пластической деформации вглубь материала и локализовать ее только в поверхностных слоях.

Трибологические свойства смазочной среды не могут рассматриваться в отрыве от материалов трибосистемы, а следовательно их выбор в трибосистему должен осуществляться комплексно.

В работах Н.А. Буше и Н.М. Алексева, посвященных вопросам совместимости материалов, поставлен ряд задач, которые необходимо решать, чтобы изучить проблему совместимости материалов [1–3].

Некоторые авторы выдвигают идею, что количественной характеристикой релаксационных свойств поверхностных слоев материалов может служить внутреннее трение [7, 8].

В работах, выполненных под руководством В.В. Шевели, показано, что релаксационные процессы проявляют более высокую структурную чувствительность к изменению напряженно-деформированного состояния материала при динамическом нагружении по сравнению с физико-механическими свойствами [9–11].

На основании выполненного анализа работ можно сделать вывод, что релаксационные свойства структуры материалов, из которых изготовлена трибосистема, влияют на совместимость материалов и являются функцией износостойкости и прирабатываемости, что доказано В.В. Шевелей [9]. В его работе приводится параметр – коэффициент затухания ультразвуковых колебаний в структуре материала, который характеризует величину внутреннего трения, и методика его измерения.

Взаимодействие материалов трибозащитных элементов со смазочной средой оценивается различными параметрами. Некоторыми авторами предлагается энергетический параметр – удельная работа изнашивания тестового материала в испытываемой смазочной среде, который связан с работой трения на удаление объема материала с поверхности трения и может выступать интегральным энергетическим параметром смазывающих свойств [4, 5].

Таким образом, можно сделать вывод, что разработка критерия, который учитывает совместимость материалов в трибосистеме, является актуальной задачей.

В основе методического подхода при исследовании функции добротности трибосистемы используется зависимость между объемной скоростью изнашивания I и скоростью работы диссипации трибосистемы $W_{тр}$ [6]:

$$I = Q^{-1} W_{тр}, \quad (1)$$

где Q^{-1} – коэффициент пропорциональности.

Запишем выражение (1) в виде размерностей:

$$\frac{\text{м}^3}{\text{с}} = \frac{\text{м}^3}{\text{Дж}} \times \frac{\text{Дж}}{\text{с}}.$$

Из размерностей следует, что коэффициент пропорциональности Q^{-1} между объемной скоростью изнашивания I и скоростью работы диссипации в трибосистеме $W_{тр}$ имеет размерность $\text{м}^3/\text{Дж}$ и является обратной величиной размерности трибологических свойств смазочной среды и одновременно внутреннего трения структуры материалов, из которых изготовлены трибозащитные элементы.

По аналогии с добротностью электрического контура в работе получим выражение для определения добротности трибосистемы:

$$Q^{-1} = \frac{I}{E_y} \sqrt{\frac{\pi}{(\delta_n \times \delta_n)}}, \text{ м}^3/\text{Дж}, \quad (2)$$

где E_y – трибологические свойства смазочной среды, $\text{Дж}/\text{м}^3$;

δ_n и δ_n – коэффициент затухания ультразвуковых колебаний в структуре материала подвижного и неподвижного трибозащитных элементов, безразмерные величины. Данные коэффициенты прямо пропорциональны внутреннему трению структуры сопряженных материалов [12].

Трибологические свойства смазочной среды можно учитывать с помощью параметра E_y , $\text{Дж}/\text{м}^3$ – удельная работа изнашивания единицы объема тестового материала (шарики из стали ШХ-15) в испытываемой смазочной среде на четырехшариковой машине [4, 5].

В таблицах 1–3 представлены трибологические свойства гидравлических, моторных, трансмиссионных масел, а также трибологические характеристики согласно ГОСТ 9490: показатель износа D_u ; критическая нагрузка P_k ; нагрузка сваривания P_c и индекс задира I_z . Анализ указанных характеристик для моторных масел показывает, что в зависимости от классификации по API показатель износа D_u отличается на 31 %, критическая нагрузка на P_k – на 37,5, нагрузка сваривания – на 50, индекс задира – на 52 % (табл. 2). При этом интегральный показатель трибологических свойств масел отличается на 65 %, что подтверждает большую чувствительность E_y по сравнению с показателями согласно ГОСТ 9490.

Как следует из выражения (2) коэффициент пропорциональности Q^{-1} между скоростью изнашивания и скоростью работы диссипации в трибосистеме обратно пропорционален трибологическим свойствам смазочной среды и произведению внутреннего трения структуры материалов подвижного и неподвижного трибоэлементов. Чем выше значение E_y , δ_n и δ_n , тем меньше значение Q^{-1} , а следовательно, и меньше скорость изнашивания (формула (1)).

На основании формулы (2) можно получить выражение для оценки добротности трибосистемы:

$$Q = E_y \sqrt{\frac{\delta_n \times \delta_n}{\pi}}, \text{ Дж/м}^3. \quad (3)$$

Из формулы (3) следует, что добротность трибосистемы – это размерная величина, которая оценивает способность сопрягаемых материалов в трибосистеме (смазочная среда и реологические свойства структуры материалов подвижного и неподвижного трибоэлементов) превращать работу сил трения в тепловую энергию, тем самым препятствовать запасам энергии в поверхностных и подповерхностных слоях трибоэлементов, которые можно оценить деформируемым объемом.

Чем большая часть работы трения будет преобразована в тепло и меньший объем материала будет участвовать в деформации, тем больше добротность трибосистемы.

Таблица 1 – Трибологические свойства гидравлических масел

Тип масел	D_u , мм	P_k , Н	P_c , Н	I_z , Н	$E_1 \times 10^{14}$, Дж/м ³	$E_2 \times 10^{14}$, Дж/м ³	$E_3 \times 10^{14}$, Дж/м ³	$E_y \times 10^{14}$, Дж/м ³
МГП-10	0,55	710	1960	24	1,5	0,38	0,006	1,886
МГ-15-В	0,5	980	1960	28	1,99	0,44	0,007	2,437
ИГП-30	0,5	980	2450	32	1,99	0,44	0,009	2,439
МГЕ-46В	0,45	980	2450	36	2,73	0,48	0,009	3,219
МГЕ-68В	0,45	980	2450	41	2,73	0,52	0,01	3,26

Таблица 2 – Трибологические свойства моторных масел

Тип масла	Классификация по API	D_n , мм	P_k , Н	P_c , Н	I_n , Н	$E_1 \times 10^{14}$, Дж/м ³	$E_2 \times 10^{14}$, Дж/м ³	$E_3 \times 10^{14}$, Дж/м ³	$E_4 \times 10^{14}$, Дж/м ³
M-10Г _{2к}	CC	0,45	1235	2450	28	2,73	0,47	0,009	3,209
Schell-Ro-tella X	CC	0,45	1235	3087	32	2,73	0,82	0,094	3,644
ESSO ULTRA	SL/CD	0,4	1568	3920	59	3,89	0,99	0,012	4,892
M-10DM	CD	0,35	1568	3087	49	5,82	0,9	0,11	6,830
Schell-Rimula D	CF/CD	0,35	1568	3087	48	5,82	0,908	0,104	6,832
ESSO ULTRON	SL/CF	0,35	1568	4900	63	5,82	0,950	0,095	6,865
Schell-Rimula C	CD	0,35	1568	3087	48	5,82	0,96	0,090	3,870
Schell-Rimula X	CF-4	0,32	1235	4900	63	7,62	0,85	0,014	8,484
ESSO ULTRA Turbo Diesel	CF-4	0,31	1568	4900	64	8,39	1,005	0,016	9,411

Таблица 3 – Трибологические свойства трансмиссионных масел

Тип масла	Классификация по API	D_n , мм	P_k , Н	P_c , Н	I_n , Н	$E_1 \times 10^{14}$, Дж/м ³	$E_2 \times 10^{14}$, Дж/м ³	$E_3 \times 10^{14}$, Дж/м ³	$E_4 \times 10^{14}$, Дж/м ³
ТСП-10	GL-4	0,45	1235	6174	76	2,73	0,79	0,12	3,64
ТАп-15В	GL-4	0,45	1235	6174	76	2,73	0,8	0,13	3,66
ТСП-15к	GL-4	0,40	1568	6174	82	3,89	0,795	0,13	4,815
ТСП-14тип	GL-4	0,40	1235	6174	82	3,89	0,802	0,14	4,832
ТАД-17и	GL-5	0,36	1568	7840	89	5,34	0,885	0,114	6,369
Shell-Spirax-AX	GL-5	0,35	1568	7840	92	5,82	0,906	0,200	6,926
Shell-Spirax-GSX	GL-4	0,35	1568	6174	86	5,82	0,945	0,200	6,965
VALVOLINE	GL-5	0,34	1235	6174	90	6,34	0,937	0,207	7,484
Shell-Spirax-ASX	GL-5	0,32	1568	7840	94	7,62	0,960	0,210	8,79

Понятие добротности трибосистемы дополняет понятие совместимости материалов в трибосистеме, под которым понимают способность контактирующих материалов приспособляться друг к другу и к изменяющимся условиям трения с учетом взаимодействия материалов со смазочной и окружающей средой, обеспечивая заданную долговечность и устойчивую работу во всем диапазоне эксплуатации [1, 3].

Увеличению добротности трибосистемы способствует увеличение трибологических свойств смазочной среды (наличие поверхностно-активных и химически активных веществ в смазочной среде), а также увеличение внутреннего трения структуры материалов, из которых изготовлены подвижный и неподвижный трибоэлементы.

Для достижения поставленной цели был спланирован трехфакторный эксперимент, где в качестве факторов были выбраны: трибологические свойства смазочной среды; коэффициент затухания ультразвуковых колебаний в материале подвижного трибоэлемента; коэффициент затухания ультразвуковых колебаний в материале неподвижного трибоэлемента.

В качестве функций отклика выбраны три параметра: среднеарифметическое значение скорости изнашивания \bar{I}_3 , м³/ч, среднеарифметическое значение коэффициента трения \bar{f}_3 , которые были получены экспериментально по результатам трех повторов, и значение добротности трибосистемы Q , которое было получено расчетным путем по выражению (3).

По результатам экспериментальных и расчетных значений перечисленных функций отклика с помощью метода наименьших квадратов получены следующие зависимости:

- для скорости изнашивания:

$$I = 60 \times 10^{-10} \exp\left(-\frac{Q}{50 \times 10^{16}}\right), \text{ м}^3/\text{ч}; \quad (4)$$

- для коэффициента трения:

$$f = 0,11 \exp\left(-\frac{Q}{110 \times 10^{16}}\right). \quad (5)$$

Коэффициент корреляции r между скоростью изнашивания I и добротностью трибосистемы Q составил 0,88, а между коэффициентом трения f и Q , – 0,90.

На основании больших значений коэффициентов корреляции можно сделать вывод, что между функцией добротности трибосистемы

и аргументами: скоростью изнашивания и коэффициентом трения, существует функциональная связь, которая подчиняется экспоненциальному закону распределения (формулы (4) и (5)).

Необходимо отметить, что функция добротности всегда положительное число и теряет физический смысл при $Q = 0$, то есть при $Q = 0$ трибосистема не существует.

При положительных значениях добротности – трибосистемы наибольшее влияние на скорость изнашивания и коэффициент трения характерно для малых значений Q . При $Q > 100 \times 10^{16}$ Дж/м³ увеличение значений добротности уже не оказывает большого влияния на скорость изнашивания и коэффициент трения трибосистемы.

Следовательно, проведенный анализ функции добротности трибосистемы позволяет установить границу значения $Q \geq 100 \times 10^{16}$ Дж/м³, при превышении которой направления снижения скорости изнашивания и коэффициента трения подбором материалов в трибосистему и смазочной среды к ним становится малоэффективным. При таких значениях добротности необходимо разрабатывать и применять другие способы повышения износостойкости и снижения потерь на трение, например, изменение конструкции или технологий изготовления и т. д.

Заключение. Исследована функция добротности трибосистемы и ее влияние на скорость изнашивания и коэффициент трения. На основании анализа большой гаммы конструкционных материалов, применяемых в трибосистемах, установлено, что величина добротности обратно пропорциональна скорости изнашивания и коэффициенту трения, а функция добротности имеет экспоненциальный характер. Установлено, что при превышении значения добротности более 100×10^{16} Дж/м³ снижение скорости изнашивания и коэффициента трения трибосистемы подбором материалов в трибосистему и смазочной среды к ним становится малоэффективным.

Список использованных источников

1. Алексеев, Н.М. Некоторые аспекты совместимости материалов при трении. I. Подповерхностные процессы // Н.М. Алексеев, Н.А. Буше // Трение и износ. – 1985. – Т. 6. – № 5. – С. 773–783.
2. Алексеев, Н.М. Некоторые аспекты совместимости материалов при трении. II. Подповерхностные процессы // Н.М. Алексеев, Н.А. Буше // Трение и износ. – 1985. – Т. 6. – № 5. – С. 965–974.
3. Алексеев, Н.М. Некоторые аспекты совместимости материалов при трении. III. Микропроцессы механической фрикционной приспособляемости // Н.М. Алексеев, Н.А. Буше // Трение и износ. – 1987. – Т. 8. – № 5. – С. 197–205.

4. Войтов, В.А. Интегральный критерий оценки трибологических свойств смазочных материалов на четырехшариковой машине / В.А. Войтов, А.В. Левченко // Трение и износ. – 2001. – Т. 22. – № 4. – С. 441–447.
5. Войтов, В.А. Трибологические свойства моторных масел для двухтактных двигателей внутреннего сгорания на растительной основе / В.А. Войтов, И.И. Сысенко, А.Г. Кравцов // Проблемы трибології. – 2014. – № 1. – С. 27–38.
6. Войтов, В.А. Моделирование процессов трения и изнашивания в трибосистемах в условиях граничной смазки. Часть 1. Расчет скорости работы диссипации в трибосистеме / В.А. Войтов, М.Б. Захарченко // Проблемы трибології. – 2015. – № 1. – С. 49–57.
7. Криштал, М.А. Внутреннее трение в металлах и сплавах / М.А. Криштал, Ю.В. Пигузов, С.А. Головин. – М.: Металлургия, 1964. – 245 с.
8. Постников, В.С. Внутреннее трение в металлах / В.С. Постников. – М.: Металлургия, 1974. – 352 с.
9. Шевеля, В.В. Реология износостойкости и совместимости пар трения / В.В. Шевеля // Трение и износ. – 1993. – Т. 14, № 1. – С. 48–63.
10. Шевеля, В.В., Трытек А. Реология вязкоупругого фрикционного контакта / В.В. Шевеля, А. Трытек // Проблемы трибологии. – 2010. – № 4. – С. 6–16.
11. Шевеля, В.В. Трибохимия и реология износостойкости / В.В. Шевеля, В.П. Олександренко. – Хмельницкий: ХНУ, 2006. – 278 с.
12. Закономерности изменения внутреннего трения в процессе работы трибосистемы и его учет при выборе совместимых материалов / В.В. Шевеля [и др.] // Трение и износ. – 1995. – Т. 16. – № 4. – С. 734–744.

Поступила 10.04.2015