

**Войтов В.А.,
Захарченко М.Б.**
Харьковский национальный технический
университет с/х им. П. Василенко,
г. Харьков, Украина
E-mail: ndch_khtusg@mail.ru

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТРЕНИЯ
И ИЗНАШИВАНИЯ В ТРИБОСИСТЕМАХ
В УСЛОВИЯХ ГРАНИЧНОЙ СМАЗКИ.
ЧАСТЬ 1. РАСЧЕТ СКОРОСТИ РАБОТЫ
ДИССИПАЦИИ В ТРИБОСИСТЕМЕ**

УДК 621.891

В работе приведены теоретические исследования по обоснованию методики моделирования процессов трения и изнашивания в трибосистемах в условиях граничной смазки. Разработана методика моделирования характеристик фактического пятна контакта и математическая модель скорости работы диссипации в трибосистеме. Приведены теоретические зависимости изменения указанных характеристик от входных параметров.

Ключевые слова: трибосистема, моделирование, скорость изнашивания, сила трения, фактическая площадь контакта, скорость работы диссипации.

Актуальность проблемы

В последнее время активно развиваются методы расчета и моделирования процессов трения и изнашивания в трибосистемах машин и механизмов, что позволяет значительно снижать 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.

Вследствие шероховатости поверхностей трения контактирование твердых тел осуществляется дискретно, в отдельных зонах – пятнах фактического контакта (ФПК). Как правило, ФПК формируются при контакте вершин неровностей, а суммарная площадь контакта состоит из множества таких микроконтактных зон.

Величина ФПК, а также размер и форма единичных пятен контакта существенно влияют на процессы трения и изнашивания, т.к. определяют напряженно-деформируемое состояние в поверхностных слоях контактируемых материалов и определяют толщину слоя материала с неоднородным распределением напряжений и деформации. На некотором расстоянии от поверхности трения напряжения существенно снижаются, и на некоторой глубине их распределение становится практически однородным.

Величина напряжений в материале, площадь ФПК и скорость деформации в поверхностных слоях материалов влияют на «загруженность» трибоэлементов в трибосистеме, которую можно оценить скоростью работы диссипации. Скорость работы диссипации является энергетическим параметром и характеризует скорость процессов превращения механической энергии в тепловую.

Поэтому при разработке моделей для прогнозирования скорости изнашивания и потерь на трение необходимо учитывать энергетические параметры, такие как скорость работы диссипации, которая связана с характеристиками ФПК.

Анализ публикаций, посвященных данной проблеме

Метод расчета ФПК, в основе которого лежит теория случайных полей применен в работе [1] для случая упругого контактирования изотропной поверхности. Дальнейшее развитие методов расчета ФПК получило в работах Н.Ф. Семенюка, где приводятся выражения для определения: градиента поверхности [2]; комплекса условий контактирования, относительной фактической площади контакта, фактического напряжения в зоне контакта и уровня деформации [3]; плотности пятен контакта и средней площади пятен контакта [4].

На основании работы Г. Циглера [5] авторами работ [6 - 8] разработан методический подход в моделировании распределения скорости работы диссипации между трибоэлементами в трибосистеме. В указанных выше работах делается вывод, что при одинаковой величине напряжений в материалах трибоэлементов на единичном ФПК скорость деформации значительно отличается, т.к. отличаются физико-механические свойства материалов трибоэлементов.

В дальнейших работах [9, 10] авторами получено окончательное выражение для расчета скорости работы диссипации с учетом деформируемого объема поверхностного слоя при трении. Используя параметр скорость работы диссипации можно определять «загруженность» трибоэлементов в трибосистеме. В указанных выше работах [6 - 10] показана функциональная связь между износостойкостью, потерями на трение трибосистем и скоростью работы диссипации в трибосистеме.

Основным недостатком приведенных выше методик является то, что моделирование и расчет скорости работы диссипации выполняется для единичного ФПК и не определяется для трибоэлемента в

целом. Разработка методики определения характеристик ФПК, количество ФПК на поверхности трения трибоэлемента, позволит рассчитывать скорость работы диссипации подвижного и неподвижного трибоэлементов и трибосистемы в целом с учетом применяемых смазочных сред.

Цель исследования

Разработать методический подход и выполнить математическое моделирование изменения скорости работы диссипации трибосистемы и отдельных трибоэлементов в зависимости от изменения шероховатости поверхностей, физико-механических свойств материалов трибоэлементов, конструктивных особенностей трибосистемы, а также трибологических свойств смазочной среды.

Методический подход в проведении исследований

В основу разработки математической модели изменения коэффициента трения и скорости изнашивания взяты основные положения системного анализа, как стратегии изучения сложных систем, к которым относятся и трибосистемы. В качестве метода исследования используется математическое моделирование, а основным принципом в моделировании является декомпозиция сложной системы на более простые подсистемы. При таком подходе математическая модель строится по блочному принципу.

Структура трибосистемы состоит из подвижного и неподвижного трибоэлементов, смазочной и окружающей среды, находящихся в постоянном взаимодействии между собой.

Входными параметрами, которые оказывают влияние на процесс трения и изнашивания, являются:

1. Технологические параметры - параметры шероховатости контактирующих поверхностей трения:

- R_{an} , R_{an} – среднее арифметическое отклонение точек профиля подвижного и неподвижного трибоэлементов, м;

- S_{mn} , S_{mn} – средний шаг неровностей по средней линии профиля подвижного и неподвижного трибоэлементов, м.

Параметры Ra и Sm определены согласно ГОСТ 2789-73.

2. Физико - механические свойства контактирующих материалов в трибосистеме:

- E_n , E_n – модуль упругости материала подвижного и неподвижного трибоэлементов.

- ν_n , ν_n – коэффициент Пуассона материала подвижного и неподвижного трибоэлементов.

3. Конструктивные параметры трибосистемы:

- F_{min} – меньшая площадь трения одного из трибоэлементов, м².

4. Эксплуатационные (рабочие) параметры:

- N – нагрузка на трибосистему, т.е. сила прижатия трибоэлементов, Н;

- $\sigma_n = N/F_{min}$ – номинальное напряжение при контактировании трибоэлементов, Па.

К выходным параметрам, которые моделируются, относятся:

- коэффициент трения;

- скорость изнашивания.

Структура математической модели состоит из следующих блоков.

1. Блок моделирования характеристик фактического пятна контакта поверхностей трения. Результатом моделирования является определение напряжений на фактическом пятне контакта, диаметра фактического пятна контакта и количество пятен контакта на номинальной площади трения.

2. Блок моделирования изменения скорости работы диссипации трибосистемы. На основании полученных характеристик фактического пятна контакта с учетом трибологических свойств смазочной среды моделируется изменение скорости работы диссипации трибосистемой, а так же подвижным и неподвижным трибоэлементами в отдельности.

3. Блок моделирования изменения коэффициента трения. На основании полученных значений скорости работы диссипации трибосистемой определяются значения коэффициента трения в зависимости от перечисленных выше входных факторов.

4. Блок моделирования скорости изнашивания. На основании полученных значений скорости работы диссипации подвижным и неподвижным трибоэлементами, а также трибосистемы в целом, с учетом внутреннего трения структуры сопряженных материалов, определяются значения скорости изнашивания при изменении входных параметров.

5. Блок проверки адекватности математической модели по критерию Фишера и расчет ошибки моделирования.

При разработке математической модели были приняты следующие допущения.

1. Контакт поверхностей трения подвижного и неподвижного трибоэлементов дискретный, пятна контакта равномерно распределены по площади трения, взаимодействия выступов шероховатостей случайно.

2. Вид контакта на единичном пятне – упругий. Такое допущение принято на основании ряда работ, где утверждается, что при первом пластическом контакте шероховатостей и нескольких раз передеформирования по причине скольжения, контакт становится упругим.

3. Температура, которая генерируется на фактических пятнах контакта, не изменяет модуль упругости и коэффициент Пуассона материалов трибоэлементов, а существенно влияет на протекание термоокислительных процессов на поверхностях трения.

4. По характеру протекающих процессов трения и изнашивания рассматриваются установившиеся режимы, после завершения приработки.

Ограничения, принятые при разработке математической модели.

1. Трибосистема функционирует в режиме граничной смазки.
2. Трибосистема функционирует в нагрузочно-скоростном диапазоне, где не возникает повреждаемости поверхностей трения, при этом, энергии активации достаточно для перестройки поверхностных слоев.

Моделирование характеристик фактического пятна контакта поверхностей трения

При моделировании характеристик ФПК последовательно определяют следующие параметры.

1. Среднее арифметическое отклонение точек профиля (эквивалентные параметры шероховатости [1]):

$$R_a = \sqrt{R_{an}^2 + R_{an}^2}, \text{ м;} \quad (1)$$

- средний шаг неровностей по средней линии:

$$S_m = \frac{R_a}{\sqrt{\left(\frac{R_{an}}{S_{mn}}\right)^2 + \left(\frac{R_{an}}{S_{mn}}\right)^2}}, \text{ м.} \quad (2)$$

При выполнении расчетов в формулах (1) и (2) используется размерность – м.

2. Градиент поверхности определяется согласно работы [2]:

$$q = \pi^2 \frac{Ra}{Sm}. \quad (3)$$

3. Приведенный модуль Юнга контактирующих материалов определяют по выражению [1]:

$$\frac{1}{E} = \frac{1 - \nu_n^2}{E_n} + \frac{1 - \nu_n^2}{E_n}. \quad (4)$$

4. Комплекс условий контактирования поверхностей согласно [3] определяют по выражению:

$$K = \frac{2,22\sigma_n}{Eq}. \quad (5)$$

5. Относительная фактическая площадь контакта согласно [3]:

$$\eta = 1 - \exp(-K). \quad (6)$$

6. Фактическое напряжения в зоне контакта [3]:

$$\sigma_{фнк} = \frac{\sigma_n}{\eta}, \text{ Па.} \quad (7)$$

7. Уровень деформации материала определяется согласно работы [3]:

$$h = \begin{cases} 3,95 \ln(5,25 - \ln K) - 6,982, & K \leq 0,6827; \\ \frac{0,422}{\ln K + 1} - 0,845, & K > 0,6827. \end{cases} \quad (8)$$

8. Плотность пятен контакта определим согласно работы [4]:

$$d_c = \frac{1}{S_m^2} \left(\frac{\pi}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{h^2}{2}\right) \left(\sqrt{h^2 + 0,4} + h\right), \text{ 1/м}^2. \quad (9)$$

9. Средняя площадь единичного пятна контакта определяется согласно [4]:

$$A_c = \frac{\eta}{d_c}, \text{ м}^2. \quad (10)$$

10. Средний диаметр единичного ФПК определяется по формуле:

$$d_{\text{фпк}} = \sqrt{\frac{4A_c}{\pi}}, \text{ м.} \quad (11)$$

11. Зная величину меньшей площади трения одного из трибоэлементов F_{min} и плотность пятен контакта, формула (9), определим количество пятен контакта на меньшей поверхности трения:

$$n = \frac{F_{\text{min}}}{A_c} \eta. \quad (12)$$

Используя разработанную методику моделирования можно получить зависимости изменения характеристик ФПК ($\sigma_{\text{фпк}}$ и $d_{\text{фпк}}$) от технологических параметров (Ra и Sm), эксплуатационных параметров (N), сочетаемых материалов в трибосистеме (E , ν), а так же конструктивных параметров трибосистемы (F_{min}).

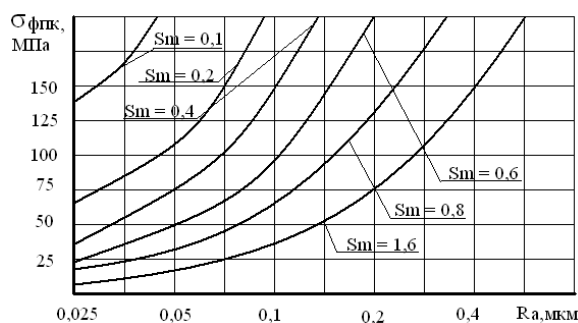


Рис. 1 – Зависимости величины напряжений на единичном ФПК от величины параметра Ra и среднего шага неровностей Sm

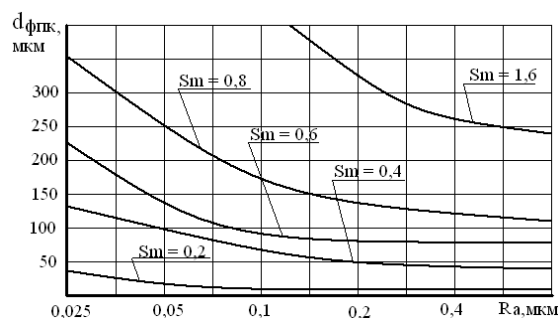


Рис. 2 – Зависимости величины диаметра единичного ФПК от величины параметра Ra и среднего шага неровностей Sm

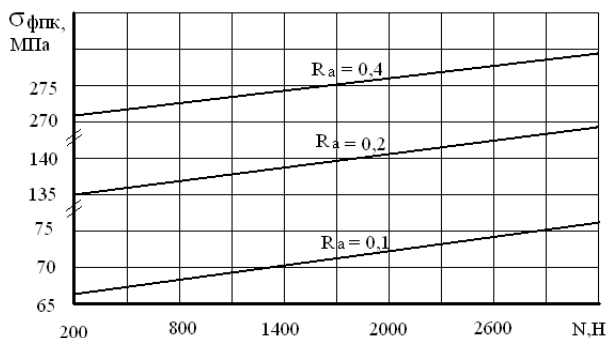


Рис. 3 – Зависимости величины напряжений на единичном ФПК от нагрузки N и параметра шероховатости Ra

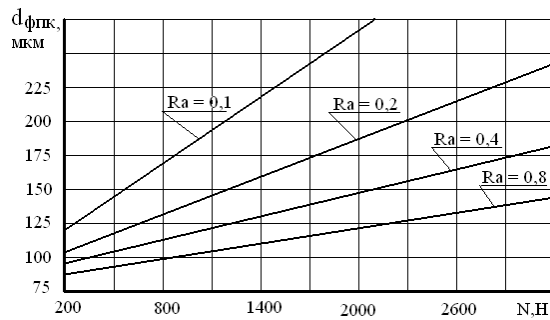


Рис. 4 – Зависимости величины диаметра единичного ФПК от нагрузки N и параметра шероховатости Ra

Результаты моделирования изменения напряжений и диаметра единичного ФПК в зависимости от Ra и Sm представлены на рис. 1 и 2. Зависимости построены для нагрузки $N = 800$ Н, $F_{\text{min}} = 0,00015$ м² и сочетания материалов сталь 40Х+Бр. АЖ 9-4 ($E_n = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па; $E_n = 1,2 \cdot 10^{11}$ Па; $\nu_n = 0,3$; $\nu_n = 0,35$).

Как следует из рис. 1 и 2 зависимости имеют нелинейный характер.

Увеличение параметра Ra в 2 раза приводит к увеличению $\sigma_{\text{фпк}}$ в 2,2 раза. Аналогичные зависимости и по влиянию параметра Sm .

Степень влияния нагрузки N на характеристики ФПК следует из зависимостей, представленных на рис. 3 и 4. Зависимости носят линейный характер. При этом, изменение параметра шероховатости Ra имеет большую степень влияния на $\sigma_{\text{фпк}}$ и $d_{\text{фпк}}$, чем параметр нагрузки N .

Из проведенного моделирования по влиянию технологических, физико-механических, конструктивных и эксплуатационных параметров на характеристики ФПК следует, что наибольший вклад вносят среднее арифметическое отклонение точек профиля поверхностей трения Ra и средний шаг неровностей по средней линии Sm , а затем, физико-механические свойства материалов трибоэлементов (модуль упругости и коэффициент Пуассона).

Увеличение Ra и Sm ведет к быстрому росту напряжений на ФПК и уменьшению диаметра ФПК. Аналогичный процесс характерен при увеличении модуля упругости и уменьшении коэффициента Пуассона.

Разработанная методика моделирования характеристик ФПК будет входить структурной составляющей в общую методику моделирования скорости изнашивания и коэффициента трения.

Моделирование изменения скорости работы диссипации в трибосистемах

Согласно работ [8 - 10] скорость работы диссипации P на единичном ФПК определяется по выражению:

$$P = \sigma_{фнк} \dot{\epsilon} V_{\phi}, \text{ Дж/с}, \quad (13)$$

где $\sigma_{фнк}$ – напряжение в материале на единичном ФПК, Па;

$\dot{\epsilon}$ – скорость деформации материала на единичном ФПК, 1/с;

V_{ϕ} – объем материала единичного ФПК участвующего в деформации, м³.

Как следует из выражения (13) скорость работы диссипации зависит от напряжения в зоне фактического контакта, скорости деформации материала и объема, участвующего в деформации.

Формулу (13) можно применять для расчета скорости работы диссипации для трибосистемы в целом, а так же для подвижного и неподвижного трибоэлементов в отдельности. Величина напряжения на ФПК у обоих трибоэлементов одинакова, а скорость деформации материалов трибоэлементов $\dot{\epsilon}$ различается, если трибоэлементы изготовлены из различных материалов (различные E и ν). Кроме этого, у различных материалов будет отличаться и объем, участвующий в деформации, что не учитывалось в ранее разработанных моделях [8 - 10].

Скорость деформации материала подвижного трибоэлемента на единичном ФПК рассчитывается по формуле:

$$\dot{\epsilon}_n = 75(1 + \nu_n)(0,86 - 1,05\nu_n) \frac{\sigma_{фнк} \cdot \nu_{ск}}{E_n \cdot d_{фнк}}, \text{ 1/с}, \quad (14)$$

для материала неподвижного трибоэлемента:

$$\dot{\epsilon}_n = 75(1 + \nu_n)(0,86 - 1,05\nu_n) \frac{\sigma_{фнк} \cdot \nu_{ск}}{E_n \cdot d_{фнк}}, \text{ 1/с}, \quad (15)$$

где $\nu_{ск}$ – скорость скольжения в трибосистеме, м/с.

Напряжение на единичном ФПК определяется по формуле (7), а диаметр единичного ФПК определяется по формуле (11).

Объем материала в предыдущих моделях [6-10] определялся как произведение площади единичного ФПК на глубину распространения деформации h . При этом глубина h принималась постоянной и равной:

$$h = 0,5 d_{фнк}.$$

Однако, анализ работ по влиянию смазочного материала на глубину наклепанного слоя в материале трибоэлемента позволяет утверждать, что глубина деформации h также зависит и от наличия поверхностно-активных веществ в смазочном материале, которые можно учитывать интегральным показателем трибологических свойств смазочного материала – удельной работой изнашивания E_y , Дж/м³. Определение и расчет показателя E_y будет представлено в последующих публикациях.

Обобщая экспериментальный материал по влиянию смазочной среды на глубину наклепанного слоя нами были получены зависимости по определению глубины деформации в материале подвижного трибоэлемента:

$$h_n = 0,5 d_{фнк} (1 - e^{-D_n}), \text{ м}, \quad (16)$$

в материале неподвижного трибоэлемента:

$$h_n = 0,5 d_{фнк} (1 - e^{-D_n}), \text{ м}, \quad (17)$$

где D_n и D_n – коэффициенты, которые учитывают способность материала к деформированию под действием поверхностно-активных веществ, для подвижного и неподвижного трибоэлементов соответственно.

На основании экспериментальных данных, приведенных в работах [6 - 10], нами были получены выражения для расчета коэффициентов D_n и D_n :

$$D_n = \frac{6,5 \cdot 10^8 \sigma_{фнк}^2}{E_n \cdot E_y}, \quad (18)$$

$$D_n = \frac{6,5 \cdot 10^8 \sigma_{фнк}^2}{E_n \cdot E_y}, \quad (19)$$

Коэффициенты D_n и D_n безразмерные.

На основании полученных выражений (16) и (17) было выполнено моделирование изменения глубины деформации при изменении трибологических свойств смазочной среды, которые учитывались параметром E_y в формулах (18) и (19). Результаты моделирования представлены на рис. 5 - 8. Начальное значение глубины деформации на основании работы [1] принято $0,5 d_{фнк}$.

Из анализа представленных зависимостей следует, что трибологические свойства смазочной среды до значений $E_y = 1,8 \cdot 10^{14} \text{ Дж/м}^3$ не оказывают влияния на глубину деформации у подвижного и неподвижного трибоэлементов. Дальнейшее увеличение E_y приводит к быстрому уменьшению глубины деформации. Это связано с наличием в смазочной среде поверхностно-активных и химически-активных веществ, которые способствуют проявлению эффекта Ребиндера.

Необходимо отметить, что сочетание материалов в трибосистеме также влияет на глубину деформации, это вытекает из выражений (18) и (19). Чем больше разница у модулей упругости материалов подвижного и неподвижного трибоэлементов, тем больше разница в глубине деформации. Для трибосистемы «сталь 40X+Бр.АЖ 9-4» бронзовый трибоэлемент имеет на 47 % большую глубину деформации, чем стальной, рис. 5. При уменьшении разницы между модулем упругости материалов трибоэлементов разница между глубиной деформации уменьшается, рис. 6 и 7, а при одинаковых материалах совсем исчезает, рис. 8.

Полученные зависимости позволяют повысить точность моделирования распределения скорости работы диссипации между подвижным и неподвижным трибоэлементами, что в дальнейшем позволит более точно рассчитывать их скорость изнашивания.

Используя выражения (16) - (19), а также выражение для площади единичного ФПК A_c (10), получим выражения для определения объема материала, который участвует в деформации на единичном ФПК.

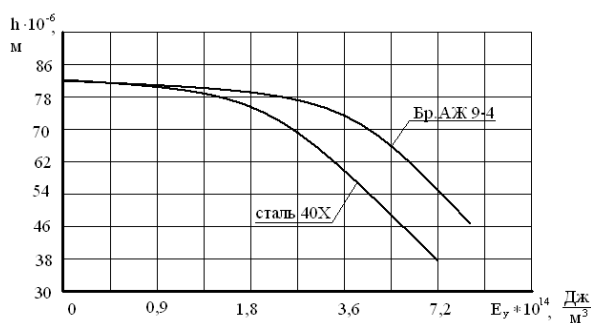


Рис. 5 – Зависимость изменения глубины деформации от трибологических свойств смазочной среды для трибосистемы: сталь 40X+Бр.АЖ 9-4

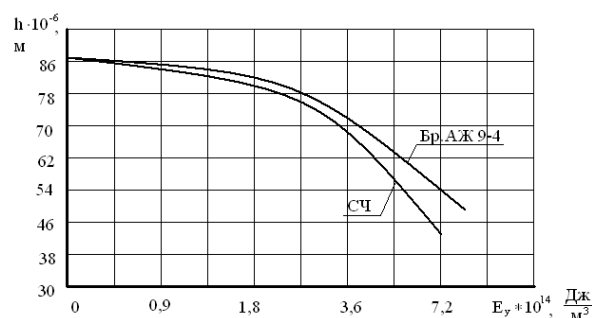


Рис. 6 – Зависимость изменения глубины деформации от трибологических свойств смазочной среды для трибосистемы: СЧ+Бр.АЖ 9-4

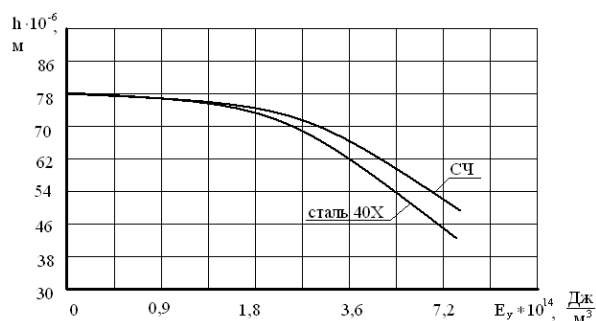


Рис. 7 – Зависимость изменения глубины деформации от трибологических свойств смазочной среды для трибосистемы: сталь 40X+СЧ

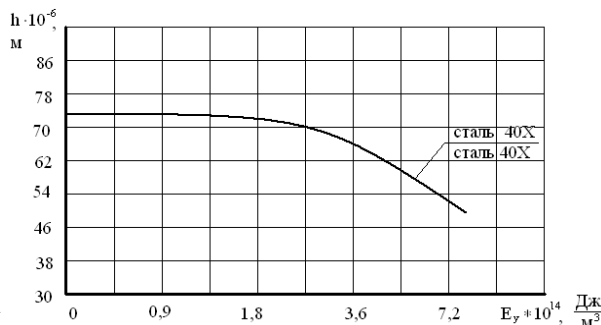


Рис. 8 – Зависимость изменения глубины деформации от трибологических свойств смазочной среды для трибосистемы: сталь 40X+ сталь 40X

Для подвижного трибоэлемента:

$$V_{дн} = h_n A_c, \text{ м}^3, \quad (20)$$

для неподвижного трибозлемента:

$$V_{\text{дн}} = h_n A_c, \text{ м}^3. \quad (21)$$

С учетом полученных выражений скорость работы диссипации в подвижном и неподвижном трибозлементах на единичном ФПК определяется по выражениям:

$$P_n = \sigma_{\text{фнк}} \dot{\epsilon}_n V_{\text{дн}}, \text{ Дж/с} = \text{Вт}, \quad (22)$$

$$P_n = \sigma_{\text{фнк}} \dot{\epsilon}_n V_{\text{дн}}, \text{ Дж/с} = \text{Вт}.$$

Скорость работы диссипации на единичном ФПК для трибосистемы в целом определяется по выражению:

$$P = P_n + P_n. \quad (23)$$

Используя выражение (12), которое позволяет рассчитать количество пятен контакта на поверхности трения трибозлемента с меньшей площадью трения (F_{min}), можно записать конечные выражения для определения скорости работы диссипации для подвижного W_n , неподвижного W_n трибозлементов и трибосистемы в целом $W_{\text{ТР}}$:

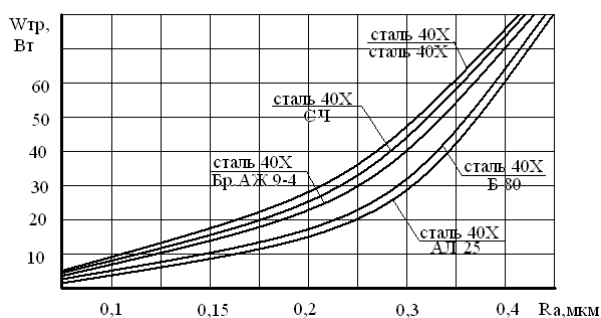


Рис. 9 – Зависимости изменения скорости работы диссипации от шероховатости Ra поверхностей трения и различного сочетания материалов в трибосистеме

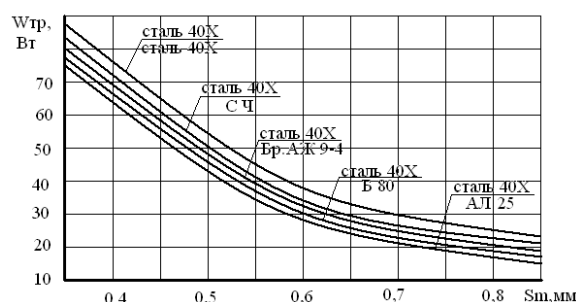


Рис. 10 – Зависимости изменения скорости работы диссипации от величины шага неровностей Sm поверхностей трения и различного сочетания материалов в трибосистеме

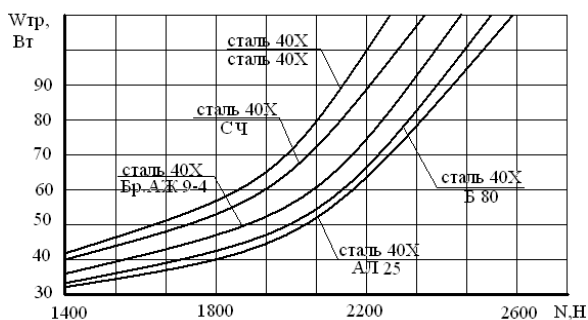


Рис. 11 – Зависимости изменения скорости работы диссипации от нагрузки и различного сочетания материалов в трибосистеме

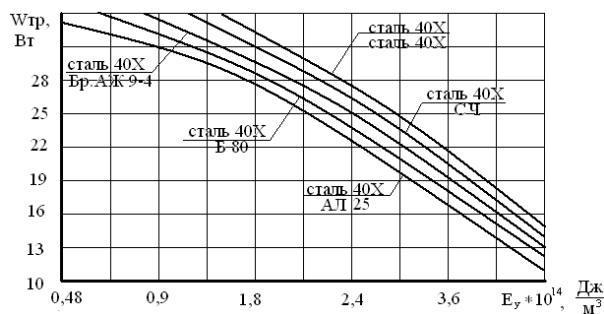


Рис. 12 – Зависимости изменения скорости работы диссипации от трибологических свойств смазочной среды и различного сочетания материалов в трибосистеме

$$W_n = P_n \cdot n, \text{ Вт}, \quad (24)$$

$$W_n = P_n \cdot n, \text{ Вт}, \quad (25)$$

$$W_{\text{ТР}} = W_n + W_n, \text{ Вт}. \quad (26)$$

Как следует из полученных выражений на величину скорости работы диссипации $W_{\text{ТР}}$ влияют параметры шероховатости поверхностей трения Ra и Sm , физико-механические свойства материалов E , ν , нагрузка и скорость скольжения N , $\nu_{\text{ск}}$, конструкция трибосистемы F_{min} , трибологические свойства смазочной среды E_y .

Результаты моделирования характера изменения скорости работы диссипации для трибосистемы в целом при изменении параметров шероховатости Ra и Sm для различных сочетаний материалов в трибосистеме представлены на рис. 9 и 10.

Результаты моделирования при изменении нагрузки и трибологических свойств смазочной среды (E_y), представлены на рис. 11, 12. Результаты получены для постоянной скорости скольжения $v_{ск} = 0,5 \text{ м/с}$.

Анализ полученных теоретических зависимостей позволяет сделать вывод о нелинейности влияния перечисленных выше параметров на скорость работы диссипации в трибосистемах. Значительный диапазон изменения данного параметра, от 2 до 100 Вт и более позволит теоретически рассчитывать скорость изнашивания и коэффициент трения для различных трибосистем с учетом технологических, конструктивных и эксплуатационных входных параметров.

Выводы

1. Разработана структурная схема построения математической модели процессов трения и изнашивания в условиях граничной смазки, которая содержит блок моделирования характеристик фактического пятна контакта, блок расчета скорости работы диссипации и блоки моделирования коэффициента трения и скорости изнашивания трибосистем. Определены допущения и ограничения при разработке математической модели.

2. Разработана методика математического моделирования характеристик фактического пятна контакта поверхностей трения. С помощью математического моделирования установлено, что среднее арифметическое отклонение точек профиля поверхностей трения и средний шаг неровностей по средней линии имеют большее влияние на величину напряжений в материале и диаметр фактического пятна контакта, чем физико-механические свойства материала, из которых изготовлены трибоэлементы, их конструктивные и эксплуатационные параметры.

3. Получила дальнейшее развитие математическая модель скорости работы диссипации в трибосистеме, которая учитывает общее количество пятен контакта на поверхности трения и глубину распространения деформации в материале подвижного и неподвижного трибоэлементов. С помощью математического моделирования установлена степень влияния трибологических свойств смазочной среды на величину скорости работы диссипации в трибоэлементах трибосистемы, что позволит повысить точность моделирования.

Литература

1. Айбиндер С.Б., Тюнина Э.Л. Введение в теорию трения полимеров. – Рига: Зинатне, 1978. – 224.
2. Семенюк Н.Ф. Исследование топографии поверхностей методом случайного поля и разработка расчетных методов оценки фактической площади контакта при трении твердых тел: Дис. ... канд. техн. Наук. – Якутск, 1983. – 149 с.
3. Terletzka, Semenjuk, Deierich. Modellierung des Kontaktes zweier rauher Körper/ Wissenschaftliche Berichte Hochschule Zittau/Görlitz Nr/ 1551 (1996), Heft 45. – S. 151 – 165.
4. Semenjuk N. Entwicklung von Berechnungsverfahren der Reibungs- und Verschleißtheorie mit Hilfe des Modells stochastischer Felder: Diss. B an der Technischen Hochschule Zittau. Zittau, 1991.
5. Циглер Г. Экстремальные принципы термодинамики необратимых процессов и механика сплошной среды. – М.: Мир, 1966. – 136 с.
6. Войтов В.А., Трошин О.Н., Багров В.А. Математическая модель распределения энергии между элементами трибосистемы в процессе трения и методика расчета. Часть I. Математическая модель определения скорости работы диссипации в элементах основных трибосистем // Проблемы трибологии. – 2006. – №3 (41). – С. 20-28.
7. Войтов В.А., Трошин О.Н., Багров В.А. Математическая модель распределения энергии между элементами трибосистемы в процессе трения и методика расчета. Часть II. Методика расчета скорости работы диссипации элементов основных трибосистем // Проблемы трибологии. – 2006. – №4 (42). – С. 24-32.
8. Войтов В.А., Трошин О.Н. Управление тепловыми потоками в трибосистеме и экспериментальная оценка износостойкости трибосистем // Проблемы трибологии – 2007. – №2 (44). – С. 95-101.
9. Войтов В.А., Великодный Д.А. Экспериментальная оценка триботехнических характеристик различных конструкций трибосистем с тепловыми сопротивлениями. Часть I. Методический подход в исследованиях // Проблемы трибологии. – 2009. – №2. – С. 25-31.
10. Войтов В.А., Великодный Д.А. Экспериментальная оценка триботехнических характеристик различных конструкций трибосистем с тепловыми сопротивлениями. Часть 2. Износостойкость и потери на трение прямых и обратных трибосистем // Проблемы трибологии. – 2009. – №3. – С. 20-28.

Поступила в редакцию 04.02.2015

Vojtov V.A., Zaharchenko M.B. **Modeling of processes of friction and wear in tribosystems in the conditions boundary lubrication. Part 1. Calculating the speed of dissipation in tribosystem.**

The paper presents the theoretical research to substantiate the techniques of modeling processes of friction and wear in tribosystems in the conditions boundary lubrication. The technique of modeling the behavior of the actual contact patch and a mathematical model of the speed of dissipation in tribosystem. The theoretical dependence of the change of these characteristics of the input parameters.

Keywords: tribosystem, modeling, wear rate, friction force, the actual contact area, the speed of dissipation.

References

1. Ajbinder S.B., Tjunina Je.L. Vvedenie v teoriju trenija polimerov. Riga: Zinatne, 1978. 224.
2. Semenjuk N.F. Issledovanie topografii poverhnostej metodom sluchajного polja i razrabotka raschetnyh metodov ocenki fakticheskoj ploshhadi kontakta pri trenii tverdyh tel: Dis. ... kand. tehn. Nauk. Jakutsk, 1983. 149 s.
3. Terletzka, Semenjuk, Deierich. Modellierung des Kontaktes zshheier rauher Kjoerper. Shhissenschaftliche Berichte Hochschule Zittau/Gjorlitz Nr/ 1551 (1996), Heft 45. –S. 151 165.
4. Semenjuk N. Entshhicklung von Berechnungsverfahren der Reibungs- und Verschleißtheorie mit Hilfe des Modells stochastischer Felder: Diss. B an der Technischen Hochschule Zittau. Zittau, 1991.
5. Cigler G. Jekstremal'nye principy termodinamiki neobratimyh processov i mehanika sploshnoj sredy. M.: Mir, 1966. 136 s.
6. Vojtov V.A. Troshin O.N., Bagrov V.A. Matematicheskaja model' raspredelenija jenerгии mezhdru jelementami tribosistemy v processe trenija i metodika rascheta. Chast' I. Matematicheskaja model' opredelenija skorosti raboty dissipacii v jelementah osnovnyh tribosistem. Problemi tribologii. 2006. №3 (41). S. 20-28.
7. Vojtov V.A., Troshin O.N., Bagrov V.A. Matematicheskaja model' raspredelenija jenerгии mezhdru jelementami tribosistemy v processe trenija i metodika rascheta. Chast' II. Metodika rascheta skorosti raboty dissipacii jelementov osnovnyh tribosistem. Problemi tribologii. 2006. №4 (42). S. 24-32.
8. Vojtov V.A., Troshin O.N. Upravlenie teplovymi potokami v tribosisteme i jeksperimental'naja ocenka iznosostjivosti tribosistem. Problemi tribologii. 2007. №2 (44). S. 95-101.
9. Vojtov V.A., Velikodnyj D.A. Jeksperimental'naja ocenka tribotehnicheskikh harakteristik razlichnyh konstrukcij tribosistem s teplovymi soprotivlenijami. Chast' I. Metodicheskij podhod v issledovanijah. Problemi tribologii. 2009. №2. S. 25-31.
10. Vojtov V.A., Velikodnyj D.A. Jeksperimental'naja ocenka tribotehnicheskikh harakteristik razlichnyh konstrukcij tribosistem s teplovymi soprotivlenijami. Chast' 2. Iznosostjivost' i poteri na trenie prjamyh i obratnyh tribosistem. Problemi tribologii. 2009. №3. S. 20-28