

**Войтов В.А.,  
Великодный Д.А.**  
Харьковский национальный технический  
университет с/х им. П.Василенко,  
г. Харьков, Украина

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ТРИБОСИСТЕМ ПРИ ПРОЯВЛЕНИИ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ПЕРЕНОСА

### Актуальность

На всех этапах жизненного цикла машин – проектирование, изготовление, эксплуатация, ремонт – инженеры стремятся оптимизировать параметры процесса трения и изнашивания с целью повышения ресурса и снижения энергозатрат. Одним из путей повышения ресурса и снижения потерь на трения в трибосистемах, например, аксиально-поршневых гидромашин, является реализация эффекта избирательного переноса. Данное направление является экономически выгодным, по сравнению с технологически направлениями и решается путем конструктивных изменений в трибоэлементах.

### Анализ последних публикаций

Данная работа является завершающей в цикле работ [1 - 3]. В работах [1, 2] выполнен анализ конструкций аксиально-поршневых гидромашин и показан путь управления тепловыми потоками в трибосистемах за счет изменения тепловых сопротивлений. В работе [3], на основании деления трибосистем на прямые и обратные, установлено явление массопереноса меди на стальные поверхности трибоэлементов обратных трибосистем. Экспериментальными исследованиями установлено [3], что основными движущими факторами интенсификации массопереноса являются: направление и величина теплового потока; температура; термоциклирование поверхностей трения медных сплавов и высокая, не изменяющаяся во времени, температура стальной поверхности.

**Целью данной работы** явилось определить зависимости изменения основных параметров фрикционного контакта без явления массопереноса и при проявлении массопереноса на обратных конструкциях трибосистем.

### Методика численного моделирования напряженно - деформированного состояния поверхностных слоев

К основным параметрам фрикционного контакта относятся:

- диаметр пятен фактического контакта;
- напряжения на пятнах фактического контакта;
- скорость деформации материалов подвижного и неподвижного трибоэлементов;
- скорость работы диссипации в подвижном и неподвижном трибоэлементах;
- температура поверхности трения;
- тепловой поток в трибосистеме.

Характер зависимостей перечисленных выше параметров от толщины пленки меди, которая формируется на поверхности трения стального трибоэлемента, позволит дать физическое объяснение снижения скорости изнашивания и коэффициента трения в таких трибосистемах, а также позволит разработать конструктивные мероприятия управления ресурсом трибосистем.

Результаты металлографических исследований, которые выполнены в работе [3] позволяют утверждать, что толщина сервовитной пленки меди на стальной поверхности, при проведении лабораторных исследований, находится в пределах 0,1 ... 0,5 мкм, т.е. соизмерима высоте шероховатостей,  $R_a \leq 0,48$ , что согласуется с данными работы [4].

Выполним численное моделирование изменения параметров фрикционного контакта в зависимости от толщины пленки меди на стальной поверхности, начиная с состояния, когда толщина равна нулю (массопереноса нет), затем с диапазоном 0,1 мкм до толщины 0,5 мкм, когда пленка меди соизмерима с шероховатостями. В последнем случае можно говорить, что поверхности трения трибосистемы имеют одноименные материалы: медь-медь.

Основными структурными элементами методики являются следующие расчеты.

1. Определяется вид контакта, упругий или пластичный для плоских поверхностей скольжения [5]:

$$N_{oc} = \frac{1,57 \cdot 5,4^v \cdot HB^{2v+1} (1 - \mu^2)^{2v} (R_2^2 - R_1^2)}{\Delta^v E^{2v}}, \quad (1)$$

где  $v$  – параметр степенной аппроксимации кривой опорной поверхности шероховатости [5, стр. 463];

$HB$  – твердость по Бринеллю материала более мягкого трибоэлемента в трибосистеме;

$\mu$  – коэффициент Пуассона материала более мягкого трибоэлемента;

$R_1$  и  $R_2$  – внешний и внутренний радиусы трибоэлемента – кольца;

$\Delta$  – безразмерный комплекс шероховатости [5, стр. 463];

$E$  – модуль упругости материала более мягкого трибоэлемента.

Если приложенная нагрузка  $N$ ,  $N$  меньше, чем расчетное  $N_{oc}$ , то контакт упругий, если  $N > N_{oc}$ , то контакт пластичный.

2. Рассчитывается контурное давление по формуле [5]:

- если контакт упругий:

$$p_c = \frac{0,15EN\Delta^{1/2}b^{3/4\nu}}{(1-\mu^2)}, \quad (2)$$

где  $b$  – параметр кривой опорной поверхности шероховатостей [5, стр. 463];

- если контакт пластичный:

$$p_c = \frac{14,5HB^5(1-\mu^2)^4}{\Delta^2 E^4}. \quad (3)$$

3. Определяется диаметр фактических пятен контакта по формуле [5] для упругого контакта:

$$d_{фнк} = \frac{2r}{\sqrt{\nu}} \left[ \frac{2\sqrt{\pi}}{k_\nu} \Delta^\nu p_c \theta \right]^{\frac{1}{2\nu+1}}, \quad (4)$$

$$k_\nu = \frac{\Gamma(\nu+1)}{\Gamma(\nu+3/2)}.$$

В случае пластического контакта:

$$d_{фнк}^{\text{II}} = \frac{2\sqrt{2r}}{\sqrt{\nu}} \Delta^{\frac{1}{2}} \left( \frac{p_c}{c\sigma_T} \right)^{\frac{1}{2\nu}},$$

где  $r$  – радиус закругления вершин неровностей шероховатости [5, стр. 463];

$k_\nu$  – числовой коэффициент, зависящий от  $\nu$  [5, стр. 216];

$\Gamma(z)$  – гамма функция аргумента  $z$ ;

$\theta = \frac{1-\mu^2}{E}$  – упругая постоянная материала;

$c \approx 3$ , коэффициент, характеризующий контакт шероховатостей [5, стр. 80];

$\sigma_T$  – предел текучести материала.

4. Определяется напряжения на фактических пятнах контакта согласно [5]:

$$\sigma_{фнк} = p_c^{\frac{1}{2\nu+1}} \left[ \frac{2^{1/2\nu} k_\nu \Delta^{1/2}}{\sqrt{\pi} \theta} \right]^{\frac{2\nu}{2\nu+1}} \quad [\text{Н/м}^2]. \quad (5)$$

5. Скорость деформации материала на фактических пятнах контакта определим по формуле [6]:

$$\dot{\epsilon} = 1,5(1+\mu)(0,86-1,05\mu) \frac{\sigma_{фнк}}{E} \frac{v_{ск}}{d_{фнк}} \quad [1/\text{с}], \quad (6)$$

где  $v_{ск}$  – скорость скольжения, м/с.

6. Скорость работы диссипации для подвижного и неподвижного трибоэлементов определим по формуле [6]:

$$\frac{dW}{dt} = P = \frac{1}{\rho} \sigma_{фнк} \dot{\epsilon} \quad [\text{Вт/кг}], \quad (7)$$

где  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>.

Согласно работы [7] скорость работы диссипации является мерой превращения механической энергии в тепловую и характерна для единицы массы материала среды. Если в выражение (7) добавить

произведение плотности на объем деформированного материала ( $\rho V_\delta$ ), то получим скорость работы диссипации на единичном пятне фактического контакта.

Объем деформируемого материала на пятнах фактического контакта определим по выражениям [8]:

$$V_\delta = \frac{\pi d_{\text{фнк}}^2}{4} h_\delta \text{ [м}^3\text{]}, \quad (8)$$

$$h_\delta = 0,5 d_{\text{фнк}} \text{ [м]},$$

где  $h_\delta$  – глубина зоны материала, на которую распространяется деформация.

С учетом (8) окончательное выражение для определения скорости работы диссипации на единичном пятне фрикционного контакта примет вид:

$$\frac{dW}{dt} = P = \sigma_{\text{фнк}} V_\delta = 0,125 \sigma_{\text{фнк}} d_{\text{фнк}}^3 \text{ [Вт]}. \quad (9)$$

Согласно работы [9] тепловой поток, который генерируется подвижным и неподвижным трибоэлементами на единичном пятне контакта можно определить по выражению:

$$q_k = \frac{P \rho T}{T_k} = \frac{P T F_n}{T_k V_\delta} = \frac{P T}{T_k \cdot 0,5 d_{\text{фнк}}} \text{ [Вт]}, \quad (10)$$

где  $T$  – температура, °К;

$F_n$  – площадь единичного пятна контакта, м<sup>2</sup>;

$T_k$  – температурный градиент, °К/м.

На рис. 1 представлена расчетная зависимость изменения диаметра пятна фактического контакта  $d_{\text{фнк}}$ , а на рис. 2 – зависимость изменения напряжения на пятнах фактического контакта  $\sigma_{\text{фнк}}$ .

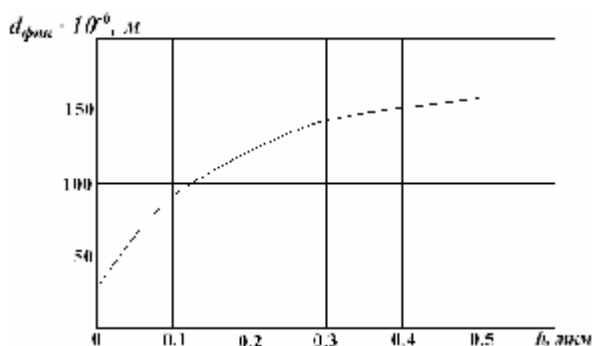


Рис. 1 – Зависимость изменения диаметра пятна фактического контакта от толщины сервоитной пленки меди

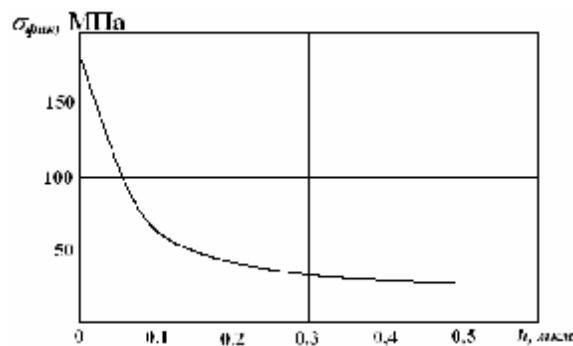


Рис. 2 – Зависимость изменения напряжения на пятнах фактического контакта от толщины сервоитной пленки меди

Как следует из представленных зависимостей, диаметр пятна фактического контакта увеличивается в 6 раз, при этом контакт шероховатостей остается упругим, а напряжение на единичном пятне контакта уменьшается в 7,5 раз. Снижение удельных давлений равносильно «разгрузке» трибосистемы при неизменной нагрузке и скорости скольжения.

Зависимости изменения скорости деформации материала и скорости работы диссипации для бронзового и стального трибоэлементов на единичном пятне контакта представлены на рис. 3 и рис. 4.

Как следует из представленных зависимостей с переносом меди на стальную поверхность трения значения скорости деформации бронзы и стали уменьшаются и при достижении толщины сервоитной пленки, равной высоте шероховатостей, имеют одинаковое значение.

С физической точки зрения это можно объяснить тем, что поверхности трения трибосистемы имеют одноименные материалы, что не противоречит физическому смыслу.

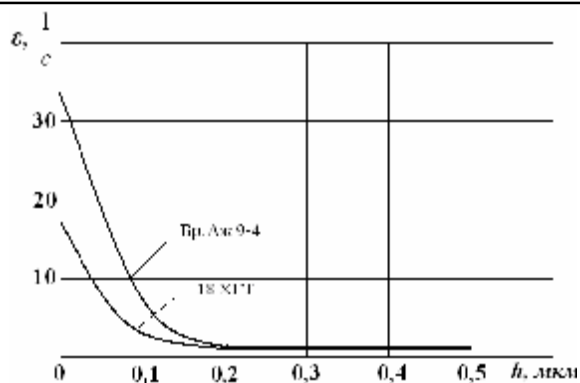


Рис. 3 – Зависимости изменения скорости деформации материала на единичном пятне контакта для бронзового и стального трибоэлементов от толщины сервовитной пленки меди

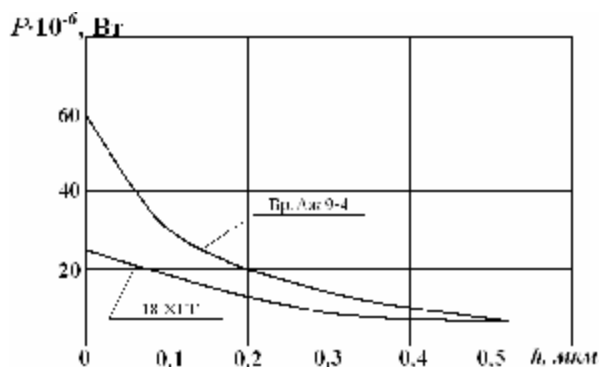


Рис. 4 – Зависимости изменения скорости работы диссипации на единичном пятне контакта для бронзового и стального трибоэлементов от толщины сервовитной пленки меди

Величина скорости работы диссипации, рис. 4, характеризует нагруженность трибоэлементов в трибосистеме. Чем больше величина скорости работы диссипации, тем больше нагружен трибоэлемент в трибосистеме [6].

Из зависимостей, представленных на рис. 4, следует, что при отсутствии сервовитной медной пленки на стальной поверхности «загрузка» трибоэлементов не равновелика. Бронзовый трибоэлемент нагружен в 2,2 раза больше, чем стальной и является тепловым генератором [1, 2] в трибосистеме.

При переносе меди с поверхности бронзы на стальную поверхность скорость работы диссипации стального и бронзового трибоэлементов уменьшается и при толщине пленки равной высоте шероховатости достигает одинакового значения, что говорит о равнозначной «загрузке» трибоэлементов в трибосистеме.

Физический смысл полученного вывода заключается в одинаковых физических свойствах материалов на поверхности трения стального и бронзового трибоэлементов, которые имеют одинаковые величины скорости деформации, напряжения на пятнах фактического контакта, а, следовательно, и скорость работы диссипации, которая характеризует превращения механической энергии в тепловую.

Из анализа зависимостей на рис. 4 следует, что при формировании пленки меди на стальной поверхности скорость работы диссипации обоих трибоэлементов уменьшается, по сравнению с трибосистемой, когда пленки нет. Это свидетельствует о мнимой «разгрузке» трибосистемы (при неизменной нагрузке и скорости скольжения), что приведет к снижению скорости изнашивания коэффициента трения, и повышению износостойкости.

Численное моделирование величины теплового потока, который генерируется на единичном пятне контакта в стальном и бронзовом трибоэлементе, рис. 5, позволяет сделать вывод, что при формировании сервовитной пленки меди величины тепловых потоков уменьшаются и становятся равновеликими, по сравнению с трибосистемой, где массопереноса нет. Это говорит о снижении теплонагруженности трибоэлементов и снижении температуры поверхности трения, рис. 6.

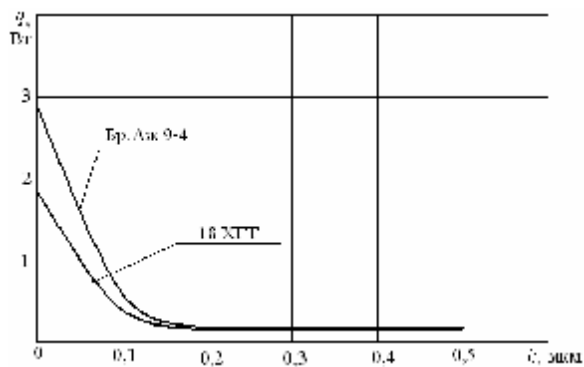


Рис. 5 – Зависимости изменения теплового потока генерируемого на единичном пятне контакта в стальном и бронзовом трибоэлементах от толщины сервовитной пленки меди

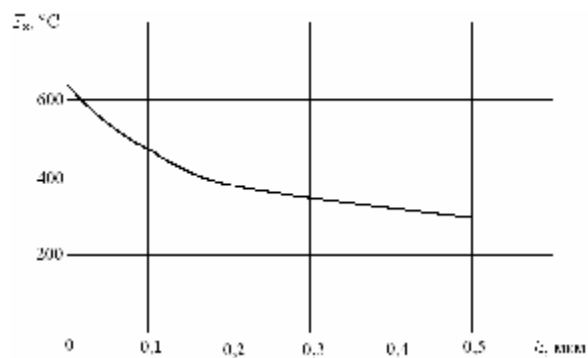


Рис. 6 – Зависимости изменения температуры поверхности трения от толщины сервовитной пленки меди

Можно предположить, что снижение теплонагруженности и объемной температуры приведет к замедлению или остановке процессов диффузии в поверхностных слоях бронзы, замедлению анодного растворения ионов меди в смазочной среде, т.к. будут заторможены процессы окисления смазочной среды, к замедлению процессов восстановления ионов меди на стальной поверхности. Такие процессы вызывают саморегулирование массопереноса внутри трибосистемы и не позволят пленке меди расти до бесконечности. После износа сервовитной пленки меди на стальной поверхности, процессы, вызывающие массоперенос, будут восстановлены, и пленка меди начнет снова формироваться.

### Выводы

Численное моделирование напряженно-деформированного состояния поверхностей трения при реализации эффекта массопереноса позволило установить, что при формировании сервовитной пленки бронзовый и стальной трибоэлемент имеют одинаковые значения скорости деформации, напряжения на пятнах фактического контакта, а, следовательно, и скорости работы диссипации, которая характеризует превращение механической энергии в тепловую. При этом скорость работы диссипации обоих трибоэлементов уменьшается, что свидетельствует о «разгрузке» трибосистемы. Установлено, что величины тепловых потоков, которые генерируются бронзовым и стальным трибоэлементом равновелики и уменьшаются, что приводит к снижению температуры и теплонагруженности трибосистемы.

### Литература

1. Войтов В.А. Экспериментальная оценка триботехнических характеристик различных конструкций трибосистем с тепловыми сопротивлениями. Часть I. Методический подход в исследованиях / В.А. Войтов, Д.А. Великодный // Проблемы трибології. – 2009. – № 2. – С. 25-31.
2. Войтов В.А. Экспериментальная оценка триботехнических характеристик различных конструкций трибосистем с тепловыми сопротивлениями. Часть II. Износостойкость и потери на трение прямых и обратных трибосистем / В.А. Войтов, Д.А. Великодный // Проблемы трибології. – 2009. – № 3. – С. 20-38.
3. Войтов В.А. Механизм повышения износостойкости трибосистем посредством управления тепловыми потоками / В.А. Войтов, Д.А. Великодный, О.Н. Трошин // Проблемы трибології. – 2010. – № 4. – С. 95-100.
4. Избирательный перенос в тяжело нагруженных узлах трения / Д.Н. Гаркунов, С.И. Дякин, О.Н. Курлов и др. / Под общ. ред. Д.Н. Горкунова. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
5. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, Н.М. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
6. Войтов В.А. Математическая модель распределения энергии между элементами трибосистемы в процессе трения и методика расчета. Часть II. Методика расчета скорости работы диссипации элементов трибосистем / В.А. Войтов, О.Н. Трошин, В.А. Багров // Проблемы трибології. – 2006. – № 4. – С. 24-32.
7. Хайтун С.Д. Механика и необратимость. – М.: Янус, 1996. – 448 с.
8. Киреенко О.Ф. Структурно-масштабная модель безызносности при трении металлических поверхностей. – Л.: Физ.-техн. ин-т, 1989. – С. 82-88.
9. Циглер Г. Экстремальные принципы термодинамики необратимых процессов и механика сплошной среды / Г. Циглер. – М.: Мир, 1966. – 136 с.

Надійшла 11.05.2011