

УДК 539.216.2

## **ВЛИЯНИЕ ТОНКИХ ПЛЁНОК ЖИРНЫХ КИСЛОТ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИСКРЕТНОГО КОНТАКТА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

В.В. Измайлов, А.Ф. Гусев, М.В. Новоселова  
ФГБОУ ВПО «Тверской государственный технический университет»  
170026, Тверь, наб. А. Никитина, д. 26  
iz2v@tvcom.ru

**Аннотация:** Экспериментально определены значения коэффициента трения в единичном контакте шар – плоскость при малых нагрузках 0,5–5 мН. Материал контактирующих тел – сталь. Эксперименты проводились при наличии на поверхности плоской детали тонких плёнок жирных кислот с различной длиной молекул. Определенные значения удельной силы трения на микроструктурном уровне превосходят приводимые в литературных источниках значения, полученные экспериментально на макромасштабном уровне.

*Ключевые слова:* коэффициент трения, удельная сила трения, жирные кислоты.

Развитие технологий так называемых микро/наноэлектромеханических систем (МЭМС/НЭМС), характерные размеры которых от миллиметра до нескольких нанометров, вызвало, в частности, интерес к изучению трибологических процессов (адгезии, трения, изнашивания) в соответствующих масштабах. Результаты этих исследований позволяют глубже понять природу такого сложного и многогранного явления, как внешнее трение.

Данная работа продолжает исследования авторов, посвященные изучению фрикционного взаимодействия в металлическом контакте на макромасштабном уровне [1-4]. К числу факторов, влияющих на адгезию и трение на микро- и наномасштабном уровне, относится наличие на поверхности тонких пленок жидкости, в частности, смазочного материала. Цель данных исследований – изучение влияния тонких плёнок жирных кислот с различной длиной молекул на коэффициент трения и параметры удельной силы трения (критическое напряжение сдвига дискретного металлического контакта).

### **1. Образцы и методика эксперимента**

Эксперименты по определению коэффициента трения и удельной силы трения в контакте стальных поверхностей проводили на микротрибометре [5]. С помощью данного прибора определяли максимальный коэффициент трения покоя по схеме шар – плоскость в диапазоне нормальных нагрузок 0,5–5 мН. Радиус площадки контакта шарового образца с плоским контртелом составлял 1,5–3,5 мкм. Такие параметры соответствуют условиям нагружения узлов МЭМС.

В качестве плоских образцов использовали концевые меры длины (называемые также плитками Иогансона). Образцы изготовлены из хромистой стали с твёрдостью  $HV$  не менее 800, что соответствует твёрдости индентирования по стандарту ISO 14577-1  $H_{IT} \approx 8,5$  ГПа. Шаровой образец имел диаметр 1 мм, изготовлен из стали ШХ15 с твёрдостью  $HV$  не менее 750. Поверхность образцов имеет шероховатость, соответствующую 13–14 классам.

Поверхности контактирующих тел перед экспериментом промывали полярным и неполярным растворителем, очищали активированным углём по методу Ахматова, затем выдерживали в вакууме при 140 °С в течение часа. Далее на поверхность плоского образца наносили тонкие плёнки жирных кислот с различной длиной углеродной цепи (см. Таблицу 1).

Капроновая, лауриновая и стеариновая кислоты относятся к насыщенным и имеют линейную молекулу, олеиновая кислота относится к мононенасыщенным и имеет двойную связь примерно в середине молекулы.

Тонкая плёнка жирной кислоты наносилась на поверхность стального полированного образца методом сливания растворов [6]. В качестве растворителя использовали бензол, который хорошо растворяет кислоты, перечисленные в Таблице 1. В результате стекания раствора и испарения легколетучего растворителя на поверхности пластинки оставался тонкий слой кислоты.

Для сравнения проводили эксперименты без нанесения на поверхность контакта пленки жирной кислоты (режим сухого трения).

Таблица 1. Свойства исследованных жирных кислот.

Название кислоты	Количество атомов углерода в молекуле	Молекулярная масса $M$	Ориентировочная длина молекулы, нм [6]
Капроновая	6	116	0,7–1,0
Лауриновая	12	200	1,5–1,8
Стеариновая	18	284	2,3–2,4
Олеиновая	18	282	–

## 2. Коэффициент трения в зависимости от молекулярной массы кислот и нагрузки на контакт

Экспериментально определённые значения коэффициента трения покоя  $f$  в исследованном контакте при различных нагрузках на шаровой образец в зависимости от относительной молекулярной массы кислот представлены на рис. 1 а. Молекулярная масса может рассматриваться как мера длины молекул жирных кислот. Точки, соответствующие нулевой молекулярной массе, относятся к трению без смазочного материала.

С ростом нагрузки коэффициент трения уменьшается. В отличие от известных результатов В. Гарди [6], который наблюдал монотонное снижение коэффициента трения в зависимости от молекулярной массы жирных кислот, в наших экспериментах эта зависимость немонотонная. Следует заметить, что в исследованиях Гарди молекулярные массы кислот ограничены значением  $M = 200$ . Кроме того, им исследовалась не металлическая пара трения – стеклянный сферический образец по плоской стеклянной пластине.

В опытах Боудена и Тейбора [6] со стальной парой трения и жирными кислотами в качестве смазки при молекулярной массе кислот  $M > 100$  коэффициент трения постоянный, что также расходится с нашими результатами, особенно в области малых нагрузок.

Значения коэффициентов трения в наших экспериментах близки к результатам Боудена и Тейбора при относительно больших нагрузках ( $f \sim 0,1$ ), но превосходят их при малых нагрузках ( $f \sim 0,15 - 0,25$  в наших экспериментах против  $f \sim 0,1$  у Боудена и Тейбора).

Зависимость коэффициента трения от нормальной нагрузки приведена на рис. 1 б. В контакте стальных поверхностей без плёнок смазочного материала зависимость  $f(N)$  убывающая во всем исследованном диапазоне нагрузок. В присутствии поверхностных плёнок коэффициент трения сначала убывает с ростом нормальной нагрузки, затем остаётся практически постоянным.

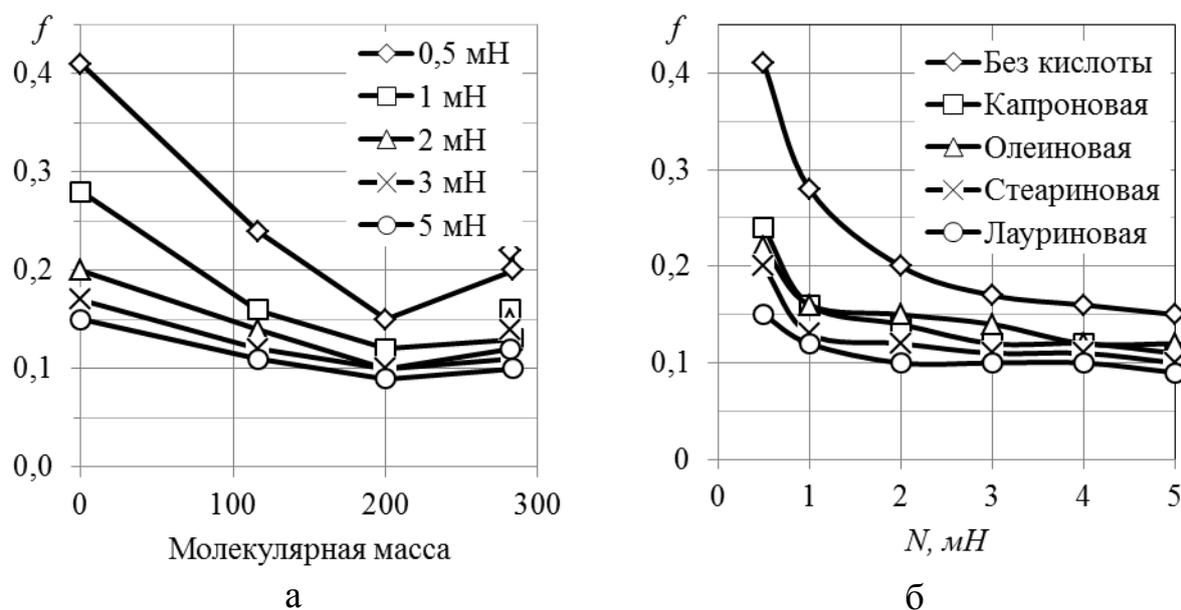


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от молекулярной массы жирных кислот при различных нагрузках в контакте (а) и от нагрузки при наличии на поверхности контакта плёнок жирных кислот (б).

### 3. Удельная сила трения и ее параметры

Коэффициент трения, определяемый как отношение силы трения  $T$  к нормальной силе  $N$  в контакте трущихся тел ( $f = T/N$ ), широко используется для характеристики пар трения и во многих случаях этой величины достаточно для решения прикладных задач при проектировании и эксплуатации фрикционных узлов. Однако такой упрощенный подход не позволяет выявить факторы, влияющие на величину силы трения и установить степень этого влияния.

Более информативной и физически более обоснованной характеристикой пары трения является удельная сила трения  $\tau$  – аналог критического напряжения сдвига в механике деформируемого твердого тела. Тогда коэффициент трения можно определить как  $f = \tau/\sigma_n$ , где  $\sigma_n$  – нормальное напряжение – характеристика прочности при сжатии контактирующих тел.

Исходя из сказанного, в описываемых экспериментах на основании измеренных значений коэффициента трения рассчитывали величину удельной силы трения  $\tau$  в зависимости от нормального контактного напряжения  $\sigma_n$  (или, что то же, от фактического контактного давления  $p_r$ ). Поскольку измерялся максимальный коэффициент трения покоя, величину  $\tau$  можно интерпретировать именно как критическое напряжение сдвига исследуемого контакта и сопоставлять его с критическим напряжением сдвига материалов контактирующих тел.

Значения удельной силы трения при наличии на поверхности контакта плёнок жирных кислот в зависимости фактического контактного давления приведены на рис. 2. Фактическое контактное давление рассчитывали на основании известной формулы Герца для радиуса контакта упругих тел с первоначальным касанием в точке:

$$p_r = \frac{N}{\pi a_r^2} = \frac{N}{\pi \left( \frac{3 NR}{4 E^*} \right)^{2/3}},$$

где  $a_r = \left( \frac{3 NR}{4 E^*} \right)^{1/3}$  – герцевский радиус контакта,  $N$  – нагрузка на шаровой образец,  $R$  – радиус шарового образца,  $E^*$  – эквивалентный модуль Юнга материалов контактирующих тел.

На основании экспериментально определенной зависимости  $\tau(p_r)$  (см. рис. 2) с помощью линейной аппроксимации  $\tau = \tau_0 + \beta p_r$  определяли параметры удельной силы трения  $\tau_0$  и  $\beta$  по И.В. Крагельскому [7]. Значения параметров  $\tau_0$  и  $\beta$  для исследованных кислот приведены в Таблице 2.

Таблица 2. Значения параметров удельной силы трения при наличии плёнок жирных кислот на поверхности контакта.

Параметр	Название кислоты			
	Капроновая	Лауриновая	Стеариновая	Олеиновая
$\tau_0$ , МПа	24	11	17	19
$\beta$	0,010	0,046	0,030	0,040

Приведённые в Таблице 2 значения  $\tau_0$  существенно превосходят аналогичные значения в контакте сталь – сталь при трении со смазкой, полученные в экспериментах на одношариковом трибометре на макромасштабном уровне [7]. Значения параметра  $\beta$  по порядку величины совпадают со значениями, полученными на макроуровне [7].

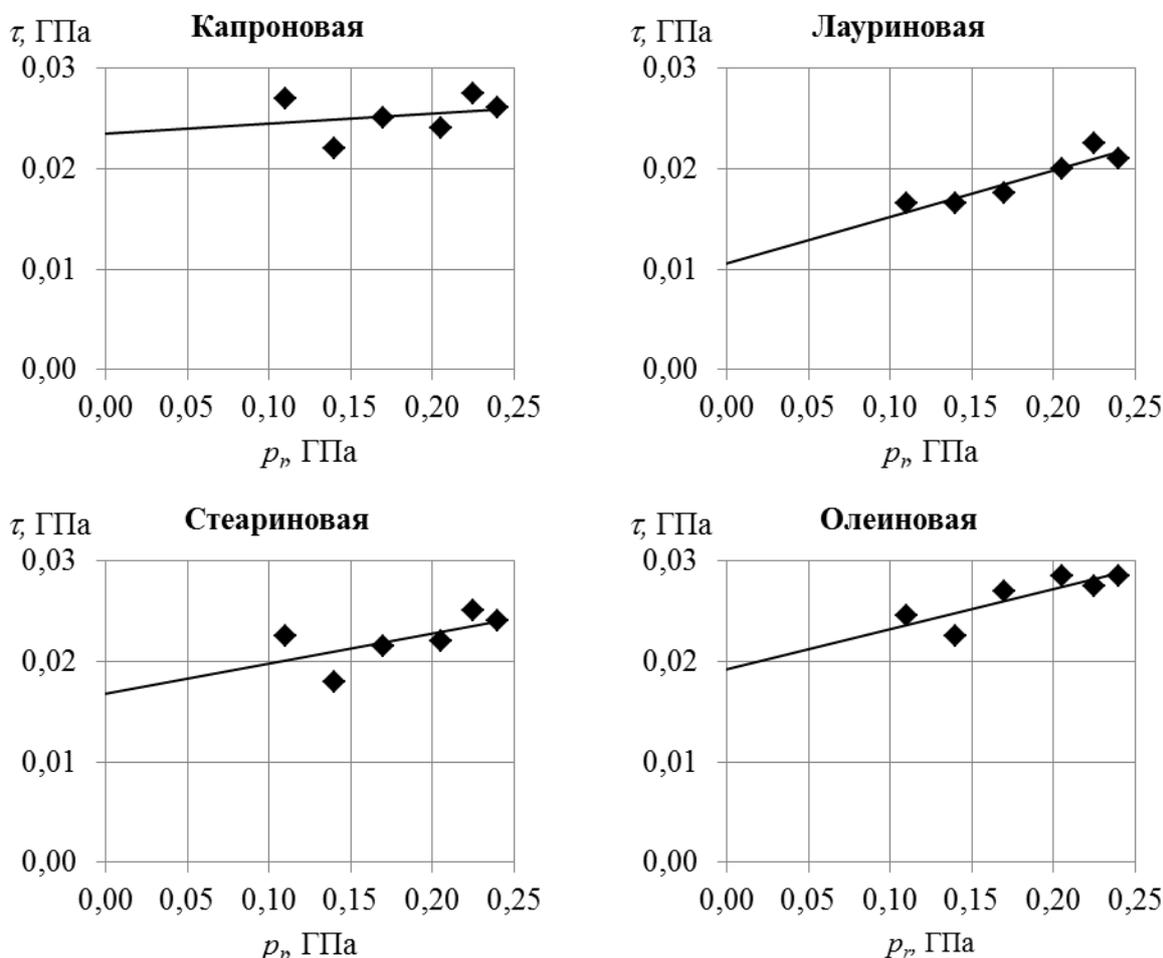


Рис. 2. Зависимость удельной силы трения от фактического давления при наличии на поверхности контакта плёнок жирных кислот.

Представляет интерес сравнить экспериментальные значения удельной силы трения поверхностей с адсорбированными молекулами

высших жирных кислот с теоретической оценкой этой величины с точки зрения нанотрибологии [8].

Относительно длинные молекулы высших жирных кислот практически полностью экранируют металлические связи в контакте и адгезионное взаимодействие происходит между концевыми метильными группами  $CH_3$  молекул кислот в соседних слоях. Границы соседних слоёв выступают в качестве плоскостей лёгкого скольжения, по которым происходит сдвиг при приложении к контакту касательного усилия. Теоретически удельную силу трения как критическое напряжение сдвига контакта обычно оценивают по формуле  $\tau = \gamma/d$ , где  $\gamma$  – величина поверхностной энергии,  $d$  – характерный атомный размер в направлении сдвига (период кристаллической решетки или диаметр атома) [8].

Примем оценочные значения [9]  $\gamma \sim 10$  мДж/м<sup>2</sup>,  $d \sim 0,5$  нм, где  $d$  – диаметр молекулы. Тогда получим  $\tau = \gamma/d \sim 20$  МПа, что хорошо согласуется с результатами наших экспериментов (см. Таблицу 2).

В экспериментах с плёнкой капроновой кислоты на поверхности контакта наблюдается своеобразный переходный режим от сдвига металлического контакта к сдвигу молекулярных слоёв жирных кислот. В этом случае получены повышенное значение  $\tau_0$  по сравнению с плёнками остальных кислот и пониженное значение параметра  $\beta$ . По-видимому, из-за малой толщины поверхностного слоя в данном случае ещё проявляется взаимодействие металлических поверхностей, хотя и сильно ослабленное.

#### 4. Заключение

Проведённые экспериментальные исследования единичного контакта шар – плоскость при малых контактных нагрузках при наличии плёнок жирных кислот на поверхности контактирующих тел показали следующее.

Наименьшие значения коэффициента трения стальных поверхностей с поверхностными плёнками жирных кислот в ряду  $n = 6...18$  ( $n$  – число атомов в молекуле кислоты) наблюдаются для плёнок лауриновой кислоты ( $n = 12$ ).

В контакте стальных поверхностей с плёнками высших жирных кислот их присутствие на поверхности контакта экранирует взаимодействие контактирующих тел, и влияние адгезионных сил становится несущественным. В этом случае величина удельной силы трения определяется адгезионным взаимодействием молекул жирных кислот, адсорбированных на поверхности контактирующих тел.

Определённые на основе описанных в работе экспериментов значения удельной силы трения превосходят приводимые в литературных источниках аналогичные значения, полученные экспериментально на

макромасштабном уровне для контакта с поверхностными плёнками смазочного материала.

### **Библиографический список:**

1. **Измайлов, В.В.** Исследование трения металлов на микроструктурном уровне в условиях граничной смазки / В.В. Измайлов, М.В. Новоселова, М.П. Вильмс // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр.* – Тверь: ТвГТУ, 2012. – Вып. 5. – С. 49-52.
2. **Измайлов, В.В.** Адгезионное взаимодействие металлов в условиях трения покоя на микромасштабном уровне / В.В. Измайлов, М.В. Новоселова, Д.А. Гусев // *Трение и смазка в машинах и механизмах.* – 2012. – № 9. – С. 40-46.
3. **Измайлов, В.В.** Исследование адгезионного взаимодействия стальных поверхностей с учетом субшероховатости / В.В. Измайлов, М.В. Новоселова // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр.* – Тверь: ТвГТУ, 2013. – Вып. 6. – С. 36-42.
4. **Измайлов, В.В.** Контактное взаимодействие на микромасштабном уровне при трении покоя / В.В. Измайлов, М.В. Новоселова // *Трение и износ.* – 2015. – Т. 36. – № 6. – С. 634-644.
5. **Пат. 2150688 Российская Федерация, МПК 7 G01N19/02.** Способ определения коэффициента трения покоя поверхностных слоев материала / Измайлов В.В., Гусев А.Ф., Нестерова И.Н., Иванова А.А.; заявитель и патентообладатель Тверской государственный технический университет. – № 98123423/28; заявл. 25.12.1998; опубл. 10.06.2000, Бюл. № 16.
6. **Ахматов, А.С.** Молекулярная физика граничного трения / А.С. Ахматов. – М.: Физматгиз. – 1963. – 472 с.
7. **Крагельский, И.В.** Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение. – 1977. – 526 с.
8. **Дедков, Г.В.** Нанотрибология: экспериментальные факты и теоретические модели / Г.В. Дедков // *Успехи физических наук.* – 2000. – Т. 170. – № 6. – С. 585-618.
9. **Абрамзон, А.А.** Поверхностно-активные вещества: Свойства и применение / А.А. Абрамзон. – Л.: Химия. – 1981. – 304 с.