

УДК 62-7

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СМАЗЫВАЕМОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ МАСЕЛ

**Калмыков В.В., Мельников Д.А., Горбачева М.С., Сухарева А.А.**

*Калужский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»,  
Калуга, e-mail: kalmykovvv@bmstu.ru*

В статье рассмотрен способ оценки смазывающей способности масел с помощью измерения их поверхностного натяжения. Дана краткая оценка физических основ, объясняющих проявление поверхностного натяжения. Приведены данные о смазывающей способности, краевом угле смачивания и поверхностном натяжении масел. Указаны основные характеристики исследуемых масел и материалов. Описано лабораторное оборудование, используемое для исследования. Определена величина поверхностного натяжения для исследуемых масел с помощью сталагмометрического метода. Приведены результаты исследования краевого угла смачивания поверхностей маслами, нанесенными на подложки из конструкционных материалов. Построена диаграмма зависимости смазываемости от конструкционных материалов. Экспериментально проверена зависимость Юнга – Дюпре и дана оценка величинам поверхностного натяжения масел от величин их плотности и прочих характеристик. Сделан вывод о влиянии поверхностного натяжения масел на смазываемость.

**Ключевые слова:** смазываемость, смачиваемость, поверхностное натяжение, сталагмометрический метод, моторное масло, трансмиссионное масло

## INVESTIGATION OF DEPENDENCE OF LUBRICATION OF CONSTRUCTION MATERIALS FROM SIDE OF SURFACE TENSION OIL

**Kalmykov V.V., Melnikov D.A., Gorbacheva M.S., Sukhareva A.A.**

*Moscow State Technical University n.a Bauman, Kaluga Branch, Kaluga, e-mail: kalmykovvv@bmstu.ru*

The article describes the method for evaluating the lubricity of oils by measuring their surface tension constructed. A brief assessment of the physical fundamentals that explain the manifestation of surface tension. Data on lubricity, wetting contact angle and surface tension of oils. The main characteristics of the investigated oils and materials are indicated. The laboratory equipment used for the study is described. The value of the surface tension for the investigated oils was determined using the stalagmometric method. The results of research of the contact angle of wetting of surfaces by oils applied to substrates made of structural materials are given. The diagram of dependence of lubricity on structural materials is constructed. The Jung-Dupree dependence was experimentally tested and the values of the surface tension of the oils were estimated from the values of their density and other characteristics. A conclusion is drawn on the effect of the surface tension of oils on lubricity.

**Keywords:** lubricity, wettability, surface tension, stalagmometric method, engine oil, gear oil

Основными эксплуатационными характеристиками масел являются химическая стабильность, вязкость и смазывающая способность. С точки зрения снижения сил трения, определяющих КПД работы машин и механизмов, а также интенсивность износа рабочих поверхностей деталей большой интерес вызывает смазывающая способность. Ввиду отсутствия приборов для непосредственного измерения смазывающей способности масел, исследователи вынуждены использовать множество методов трибологического анализа. Целью данной работы является стремление показать, что смазывающую способность масел можно оценить через измерение их поверхностного натяжения.

Смазывающая способность – это проявление взаимодействия молекул на трехфазной границе твердой, жидкой и газо-

образной. Она определяется коэффициентом смачиваемости  $\theta$  и может быть определена с помощью второго закона капиллярности (смачиваемости) – равенства Юнга (1). На рис. 1 представлена силовая схема краевого угла смачивания.

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{1,3} - \sigma_{2,3}}{\sigma_{1,2}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{1,3}$  – поверхностное натяжение на границе твердое тело – воздух;  $\sigma_{2,3}$  – поверхностное натяжение на границе твердое тело – жидкость;  $\sigma_{1,2}$  – поверхностное натяжение на границе жидкость – воздух.

Поверхностное натяжение на границе твердое тело – воздух принято называть поверхностной энергией [1].

Различают смачиваемую (гидрофильную,  $\theta < 90^\circ$ ) и несмачиваемую поверхность (гидрофобную,  $\theta > 90^\circ$ ).

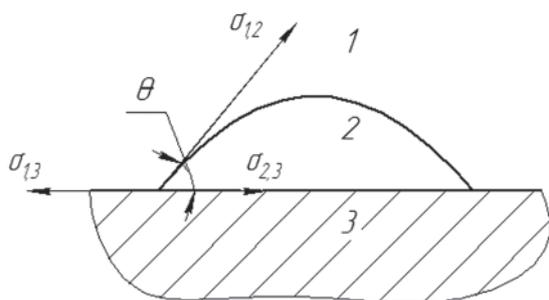


Рис. 1. Факторы, определяющие краевой угол смачивания:

1 – воздух; 2 – жидкость; 3 – твердое тело

Коэффициентом поверхностного натяжения называется физическая величина, численно равная силе поверхностного натяжения  $G_s$  (2), которая действует на линию разрыва единичной длины [2]. Наиболее ярким примером является поверхностное натяжение жидкости на границе с газом.

Поверхностное натяжение – это удельная свободная поверхностная энергия. Оно существует на границе твердых, жидких и газообразных тел. Поверхностное натяжение образуется из-за молекул жидкости, которые находятся вблизи поверхности и, следовательно, имеют избыток потенциальной энергии  $P$ , по сравнению с молекулами, которые располагаются внутри жидкости [3; 4].

$$G_s = \sigma \cdot S, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение;  $S$  – поверхность.

Снижение поверхностного натяжения может наблюдаться при тепловых, механических, химических и электрических про-

цессах. Схема образования поверхностного натяжения изображена на рис. 2.

Поверхностное натяжение является одним из самых важных свойств дисперсных систем, и от его величины зависят такие явления, как капиллярность и смачиваемость. Это обстоятельство позволяет связать явление смачиваемости со смазывающей способностью, если объектом исследования выступает масло.

### Материалы и методы исследования

Для достижения цели была поставлена задача оценить смазываемость конструкционных материалов маслами с разной величиной поверхностного натяжения. В качестве объектов исследования были выбраны образцы подложек из стали 45, 12X18H10T, Д16Т, ЛС 59-1. Чтобы уменьшить влияние на смазываемость микрогеометрии, все образцы подвергались шлифованию до достижения поверхностями шероховатости Ra 0,22 мкм.

Сталь 45 – конструкционная углеродистая качественная сталь. Она применяется во всех видах промышленности, где от деталей требуется повышенная прочность, надежность и износостойкость [5].

12X18H10T – хром-никелевая нержавеющая сталь благодаря исключительному сочетанию прочностных характеристик и свойств нержавеющей стали получила широкое применение не только в машиностроении, но и в пищевой, нефтяной и химической промышленности. Ее используют в работе под высоким давлением, в окислительных средах, при низких (до  $-269^\circ\text{C}$ ) и при высоких (до  $+600^\circ\text{C}$ ) температурах [6].

Д16Т – дюралюминиевый сплав с высоким содержанием магния получил широкое распространение благодаря оптимальному сочетанию цены и качества. Он обладает хорошей механической обрабатываемостью и высокими прочностными характеристиками [7]. Д16Т применяется в судостроительной, авиационной и космической промышленности и для изготовления деталей для машин и станков.

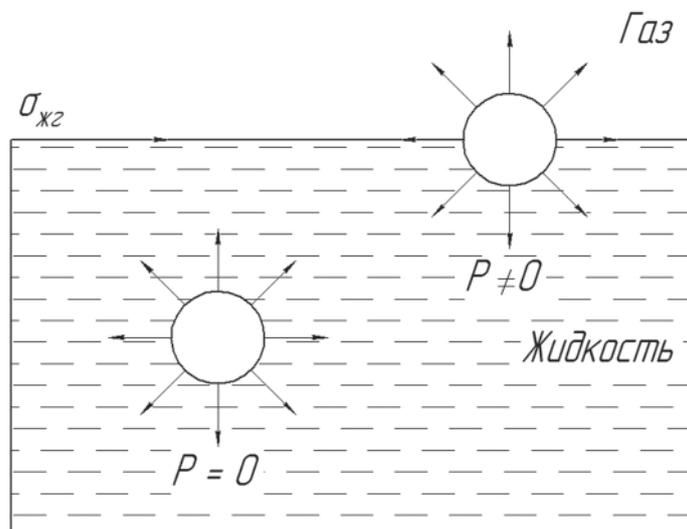


Рис. 2. Схема образования поверхностного натяжения

ЛС59-1 – это специальный многокомпонентный сплав, состоящий из меди, цинка, свинца и примесей. Цинк и свинец в сплаве являются легирующими элементами, которые улучшают физические и химические свойства меди. Благодаря высокой твердости, невысокой стоимости, отличной обрабатываемости на станках, коррозионной стойкости и антифрикционными свойствам латунь ЛС59-1 широко используется во всех видах производства [8].

В качестве смазывающих веществ исследовались минеральные масла Lukoil Standart (SAE 10w-40) и OILRIGHT ТАД-17и (SAE 80w-90).

Lukoil Standart 10w-40 – это моторное минеральное масло, произведенное из высококачественной минеральной основы и пакета присадок высокого качества. Является бюджетным маслом для круглогодичного использования в двигателях автомобилей с большим пробегом и повышенным расходом моторного масла. Оно обеспечивает отличную защиту мотора от износа и коррозии (устойчиво к окислению), сохраняет вязкость, стабильность при перепадах температур. Оно работоспособно в диапазоне температур от –32 до 140 °С [9].

OILRIGHT ТАД-17и 80w-90 – универсальное все-сезонное трансмиссионное минеральное масло для автомобилей и другой техники, работающих в сложных температурных условиях при высоких удельных нагрузках и скоростях скольжения. Обладает высокопрочной масляной пленкой, которая обеспечивает надежную работу трансмиссии при напряженных режимах трения в зонах контакта. Оно работоспособно в диапазоне температур от –25 до +130...140 °С [10].

В данной работе поверхностное натяжение масел определялось сталагмометрическим методом. Для этого

было использовано следующее оборудование: сталагмометр, емкость для сбора капель и ареометр. Внешний вид лабораторной установки представлен на рис. 3.

Сталагмометр – прибор для определения поверхностного натяжения жидкостей, представляющий из себя стеклянную трубку с капилляром в нижней части.

Поверхностное натяжение определялось сталагмометрическим методом или методом счета капель. Данный метод считается самым простым способом измерения поверхностного натяжения с технической точки зрения. Для определения числа капель пользуются сталагмометром [11]. Он представляет собой стеклянную трубку, заканчивающуюся капилляром, из которого исследуемая жидкость вытекает каплями.

Определение поверхностного натяжения этим методом [12] заключается в сравнении количества капель при истечении из сталагмометра исследуемой жидкости  $n_x$  и жидкости  $n_0$  с известным поверхностным натяжением  $\sigma_0$ .

Значения поверхностного натяжения исследуемой жидкости рассчитывались по формуле

$$\sigma_x = \sigma_0 \cdot \frac{\rho_x \cdot n_0}{\rho_0 \cdot n_x}, \quad (3)$$

где  $\rho_x$  и  $\rho_0$  – плотность исследуемой и стандартной жидкостей [12].

Было произведено измерение плотности масел  $\rho$  с помощью лабораторного ареометра:

Для Lukoil Standart 10w-40:  $\rho_1 = 0,84 \text{ г/см}^3$ .

Для OILRIGHT ТАД-17и 80w-90:  $\rho_2 = 0,885 \text{ г/см}^3$ .

Для определения зависимости смазывающей способности от поверхностного натяжения были экспериментально определены величины краевых углов смачиваемости для исследуемых масел на каждом конструкционном материале.

Таблица 1

Физико-химические характеристики масел [9; 10]

Параметр	Lukoil Standart 10w-40	OILRIGHT ТАД-17и 80w-90
Вязкость кинематическая при 100 °С, мм <sup>2</sup> /с	12,5–16,3	17,5
Индекс вязкости, min	120	100
Температура вспышки в открытом тигле, °С, min	205	200
Температура застывания, °С, max	–32	–25
Щелочное число, мг КОН/1 г масла, min	5,0	5,0
Зольность сульфатная, %, max	1,2	0,3
Массовая доля Р, %, max	0,12	0,1



Рис. 3. Лабораторная установка

Таблица 2

№ п/п	Исследуемая жидкость	$n_i$	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\sigma \cdot 10^{-3}$ , Н/м
1	Lukoil Standart 10w-40	55	0,84	34,44
2	OILRIGHT ТАД-17и 80w-90	47	0,885	42,47
3	Вода	31	1	72,75

### Результаты исследования и их обсуждение

1. Определение поверхностного натяжения масел (табл. 2).

$$\sigma_1 = \sigma_3 \cdot \frac{\rho_1 \cdot n_3}{\rho_3 \cdot n_1}; \quad \sigma_2 = \sigma_3 \cdot \frac{\rho_2 \cdot n_3}{\rho_3 \cdot n_2},$$

где  $\sigma_1$  – поверхностное натяжение моторного масла Lukoil Standart 10w-40, Н/м;  $\sigma_2$  – поверхностное натяжение трансмиссионного масла OILRIGHT ТАД-17и 80w-90, Н/м;  $\sigma_3$  – поверхностное натяжение воды, Н/м;  $\rho_1$  – плотность моторного масла Lukoil Standart 10w-40, г/см<sup>3</sup>;  $\rho_2$  – плотность трансмиссионного масла OILRIGHT ТАД-17и 80w-90, г/см<sup>3</sup>;  $\rho_3$  – плотность воды, г/см<sup>3</sup>;  $n_1, n_2, n_3$  – количество капель моторного масла Lukoil Standart 10w-40, трансмиссионного

масла OILRIGHT ТАД-17и 80w-90 и воды соответственно.

$$\sigma_1 = 72,75 \cdot \frac{0,84 \cdot 31}{1 \cdot 55} = 34,44 \text{ Н/м};$$

$$\sigma_2 = 72,75 \cdot \frac{0,885 \cdot 31}{1 \cdot 47} = 42,47 \text{ Н/м}.$$

2. Определение краевого угла смачиваемости исследуемых масел (рис. 4; 5).

При определении смачиваемости в качестве твердого тела были использованы подложки из стали 45, 12X18H10T, Д16Т, ЛС59-1 с одинаковой шероховатостью поверхностей Ra 0,22 мкм.

Результаты средних значений измерений краевого угла приведены в табл. 3.

3. Построение диаграммы (рис. 6).

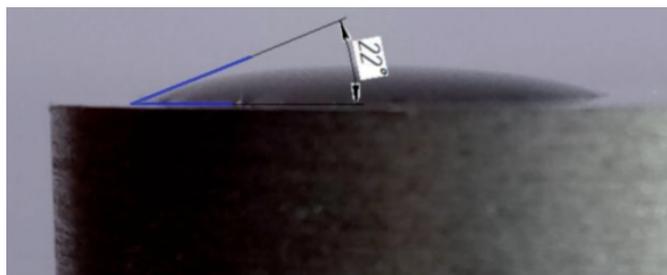


Рис. 4. Краевой угол смачиваемости трансмиссионного масла OILRIGHT ТАД-17и 80w-90

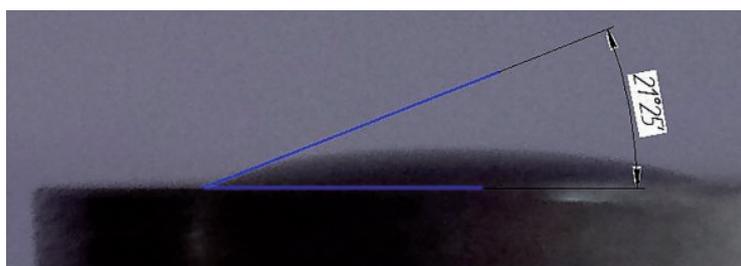


Рис. 5. Краевой угол смачиваемости моторного масла Lukoil Standart SAE 10w-40

Таблица 3

Подложка	Краевой угол $\theta$ моторного масла Lukoil Standart 10w-40	Краевой угол $\theta$ трансмиссионного масла OILRIGHT ТАД-17и 80w-90
Сталь 45	20,37	22
12X18H10T	14,7	15,3
Д16Т	14,87	17,87
ЛС59-1	15,95	19,62

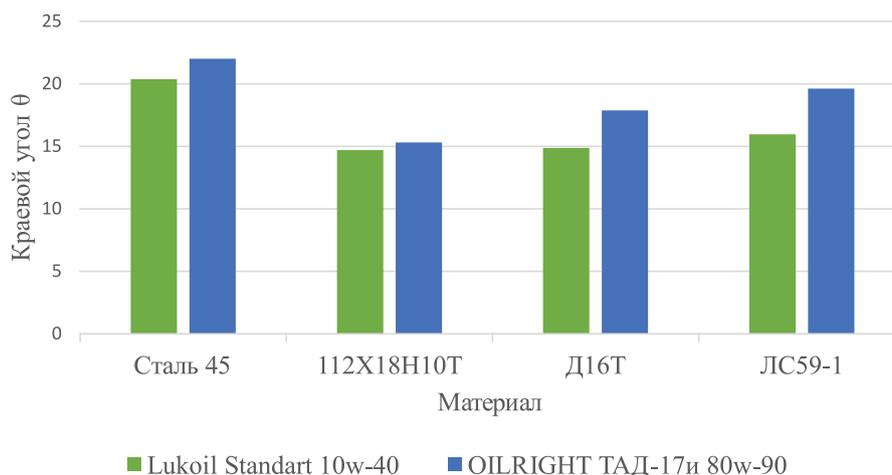


Рис. 6. Диаграмма зависимости краевого угла от материала подложки

### Выводы

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что масла с наименьшим значением поверхностного натяжения обладают наилучшей смазывающей способностью. Необходимы дополнительные исследования, которые позволят определить наиболее значимые факторы, с помощью которых станет возможным с большей эффективностью управлять поверхностным натяжением смазывающих жидкостей.

Проведенные исследования могут быть полезны при выборе смазывающих веществ обладающих наилучшей смачиваемостью.

### Список литературы

1. Калмыков В.В., Мусохранов М.В., Логутенкова Е.В., Герасимова Н.С. Энергия поверхностей в формировании сопряжений при сборке изделий // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 5–2. – С. 249-252.
2. Логинова А.Ю., Герасимова Н.С. Измерение поверхностного натяжения жидкостей / Методические указания по курсу «Спецглавы химии». – Калуга, 2001. – 15 с.
3. Щукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А., Коллоидная химия. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2004. – 445 с.

4. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. – М.: Химия, 1989. – 464 с.

5. Сталь 45 металлопрокат [Электронный ресурс] // TotalMetall.com. – URL: <http://www.totalmetall.com/Stalikonstrukcionnie/45.html> (Дата обращения 10.04.2017).

6. Сталь 12X18N10T: характеристика, применение и цены на металлопрокат [Электронный ресурс] // Комсомольская правда. – URL: <http://www.kp.ru/guide/stal-12kh18n10t.html> (Дата обращения: 10.04.2017).

7. Дюралевый прокат и изделия из дюралю. Особенности и применение. [Электронный ресурс] // Комсомольская правда. – URL: <http://www.kp.ru/guide/djurallevyi-prokat.html> (Дата обращения: 10.04.2017).

8. Латунь ЛС59-1 [Электронный ресурс] // Cu-Prum Цветной металлопрокат. – URL: <http://cu-prum.ru/latun/lc59-1.html> (Дата обращения: 10.04.2017).

9. Лукойл стандарт SAE 10W-40 API SF [Электронный ресурс] // СС. – URL: <http://maslenka.ru/catalog/motor-oil/lukoil-standart-sae-10w-40-api-sf-cc.html> (Дата обращения: 5.04.2017).

10. Трансмиссионное масло ТАД-17 (ТМ-5-18). [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.expert-oil.com/site.xp/051048055124049050052052.html> (Дата обращения: 5.04.2017).

11. Фролов Ю.Г., Гродский А.С., Назаров В.В., Моргунов А.Ф. Лабораторные работы и задачи по коллоидной химии / под ред. Ю.Г. Фролова и А.С. Гродского. – М.: Химия, 1986. – 216 с.

12. Бурых Г.В. Образование, устойчивость и свойства дисперсных систем: методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Коллоидная химия». – Курск, 2015. – 16 с.