

1. Panasjuk I.V. Osoblivosti ozdobljuval'no-zachishhuval'noї obrobki detalej legkoї promislivosti tehnologichnim seredovishhem / I.V.Panasjuk, O.P. Burmistenkov, M.G. Zaljubovs'kij // Visnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu. Tehnični nauki – 2013. – №3. – S. 190-194.
2. Panasjuk I.V. Vznachennja dejakih konstruktivnih parametriv zmishuvachiv z trivimirnim obertannjam barabanu / I.V.Panasjuk, M.G. Zaljubovs'kij // Visnik Kiїvs'kogo nacional'nogo universitetu tehnologij ta dizajnu – 2013. – №5. – S. 76-81.
3. Oborudovanie dlja pererabotki supuchih materialov: uchebnoe posobie / [V.Ja. Borshhev, Ju.I. Gusev, M.A. Promptov, A.S. Timonin]. – M.: «Izdateľstvo Mashinostroenie-1», 2006. – 208 s.
4. Arratia P. E., A study of the mixing and segregation mechanisms in the Bohle Tote blender via DEM simulations / P. E. Arratia, Nhat-hang Duong, F.J. Muzzio, P. Godbole, S. Reynolds // Powder Technology. – 2006. – Volume 164, Issue 1. – P. 50-57
5. Alonso M. Powder coating rotary mixer rocking motion / M. Alonso, M. Satoh, K. Myanami // Powder Technology. – 1988. – № 56 – R.135-141.
6. Smesitel' inercionnyj prostranstvennyj // Inform. listok № 345-82, Tatarskij CNTI, -Kazan', 1982. - 3 s.
7. Silovoj analiz semizvennogo inercionnogo prostranstvennogo smesitelja // Sovershenstvovanie ispol'zovanija s.-h. tehniki. Sb. nauch. trudov v 2-h chastjah. Ch 2. – Kazan', 1988. – S. 68-75.

Рецензія/Peer review : 6.11.2013 р. Надрукована/Printed :21.11.2013 р.

Рецензент: Бурмістенков О.П., д.т.н., проф., професор кафедри електромеханічних систем Київського національного університету технологій та дизайну

УДК 620.17

А.И. АЛИЕВ

РВУЗ «Крымский инженерно-педагогический университет», г. Симферополь

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА

Рассмотрены методики определения трибохарактеристик процесса трения двух твердых тел в присутствии «третьего тела» (смазочного материала). Предложен способ определения коэффициента трения путем модернизации существующей методики определения коэффициента относительной адгезионной активности фрикционной пары.

Ключевые слова: коэффициент трения, адгезия, фрикционная пара.

A.I. ALIEV

Republican Higher Educational Institution “Crimean Engineering-Pedagogical University”, Simferopol', Ukraine

EXPERIMENTAL METHODOLOGY FOR QUANTIFYING TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF LUBRICANT

Abstract - The aim of the research - to explore the possibility of comparing the tribological properties of the oils offered as metalworking fluids with the aid of techniques provides not only quality, but also a quantitative assessment of the effectiveness of the lubricant.

In our opinion, the horizontal portion of the experimental curve at first test characterizes the carrying capacity of lubricating films in friction units. In vegetable oils is noticeably longer than that of mineral oil, lubricating films and hence longer retain their effectiveness.

Thus, the determination of the coefficients of friction by the proposed method of quantitative evaluation of the tribological properties of oils allowed to get a better idea of the effect of lubricants on the surfaces of frictional contact.

Keywords: tribological properties, lubricant, frictional contact.

Постановка задачи

Изучение особенностей процесса трения и адгезионного взаимодействия продолжает привлекать внимание многих исследователей. Это вызвано, прежде всего, необходимостью определения основных закономерностей, управляющих этими процессами. На сегодняшний день существуют различные системы взглядов на природу процесса трения и на его главный фактор – адгезию. В связи с этим целью данной работы ставится анализ этих систем и выявление наиболее приемлемой методики, позволяющей осуществлять выбор смазочного материала для заданной фрикционной пары.

Анализ исследований и публикаций

Среди существующих методик определения степени влияния СОТС на адгезионные характеристики контакта при трении [1] рассмотрим три методики, позволяющие получить необходимые данные о взаимодействии обрабатываемого и инструментального материалов в присутствии масел.

Известно [2], что коэффициент трения в общем виде имеет две составляющие: адгезионную и деформационную. При этом:

$$f = f_{адг} + f_{деф},$$

Деформационная составляющая $f_{деф}$ коэффициента трения может быть рассчитана на основании механики сплошных сред, а адгезионная равна:

$$f_{адг} = \frac{\tau_n}{\rho_r},$$

где τ_n – прочность на срез связей образуемых на поверхностях раздела;

ρ_r – фактическое давление в контакте.

Величину τ_n в настоящее время вычислить теоретически не представляется возможным, поэтому ее определяют экспериментальным путем. В работе [3] предлагаются метод и прибор для определения тангенциальной прочности адгезионных связей на срез под нормальной нагрузкой. Согласно этой методике, деформационная составляющая в измерениях пренебрежительно мала и ее можно не учитывать [4].

В модельном варианте, для случая трения шарового индентора по плоскости, значение τ_n определяется на основе экспериментальных исследований из соотношения:

$$\tau_n = \frac{3 \cdot F_{\text{экс}} \cdot R_{\text{экс}}}{4 \cdot \pi \cdot r_{\text{отп}}^3},$$

где $F_{\text{экс}}$ – окружная сила на диске, вращающем индентор;

$R_{\text{экс}}$ – радиус диска, в котором закрепляется индентор;

$r_{\text{отп}}$ – радиус отпечатка (лунки) на образцах.

Прибор (рис. 1) представляет собой трибометр, содержащий станину 1, к которой прикреплена направляющая рама 2 с верхней и нижней осями 3. Между ними в охлаждаемых образцедержателях 4 установлены плоские образцы 5 из обрабатываемого материала. Между образцами 5 в поворотном диске 6 закреплен сферический индентор 7. Нижняя ось 3 через нижнюю осевую опору 8 связана с гайкой 9, а верхний конец верхней оси 3 – с призмой 10, которая контактирует с рычагом 11. На другом конце рычага 11 подвешен груз 12. Поворотный диск 6 кинематически связан с ходовой гайкой 13, установленной на ходовом винте 14, соединенном с электродвигателем 15. На ходовой гайке 13 установлены тензоэлементы 16, связанные через усилитель 17 с двухкоординатным самопишущим потенциометром 18.

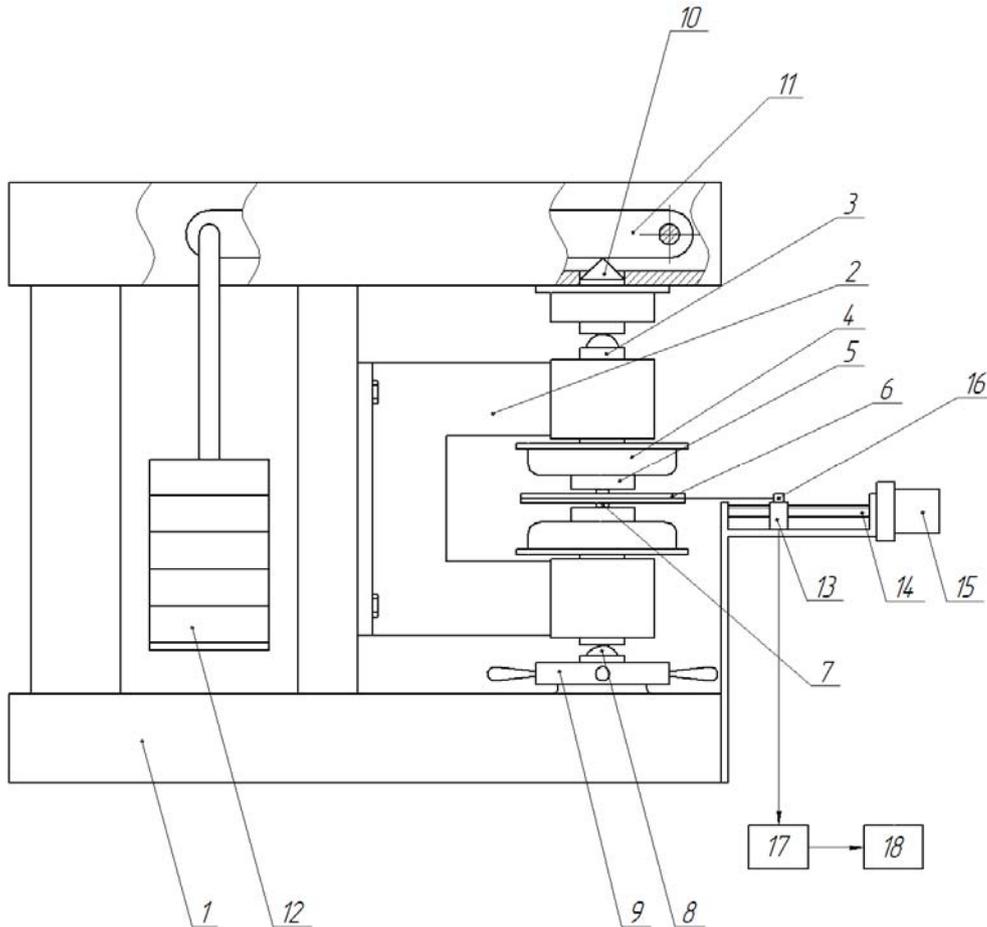


Рис. 1. Схема трибометра

На использовании этого же прибора основана и другая методика, предлагаемая в работе [5]. Согласно этой методике, адгезионную активность фрикционного контакта оценивают уровнем прироста поверхности фактического сдвига (ПФС) – ΔS при его перемещении

$$\Delta S = \frac{\Delta F_{\text{экс}}}{S \cdot \tau_{\text{сд}}},$$

где $\Delta F_{\text{экс}}$ – прирост силы трения при постоянной для всех случаев величине угла поворота $\Delta\varphi$ шарового индентора (определяется экспериментально);

τ_{cd} – сопротивление обрабатываемого материала на сдвиг (зависит от нагрузки – упрочнение и температуры T °С – разупрочнение)

$$\tau_{cd} = \frac{F_{\text{ЭКС}}^{np}}{S_{ob}},$$

где $F_{\text{ЭКС}}^{np}$ – предельная сила трения (определяется экспериментально);

S_{ob} – поверхность трения фрикционного контакта (общая поверхность сферических отпечатков на образцах)

$$S_{ob} = S_1 + S_2,$$

где S_1 и S_2 – поверхности трения индентора с нижним и верхним образцами

$$S_i = \frac{\pi \cdot D_i (D_i - \sqrt{D_i^2 - d_i^2})}{2},$$

где D – диаметр шаровой поверхности индентора, мм;

d – диаметр отпечатка, мм;

$i = 1, 2$ – верхняя или нижняя поверхность трения.

Для оценки коэффициента относительной адгезионной активности (ОАА) рассматриваемого обрабатываемого материала к инструментальному в присутствии смазочного материала, например растительного масла, эксперимент необходимо проводить дважды (рис. 2). Первый раз записывают кривую роста силы трения $F_{\text{ЭКС}}$ при вращении индентора всухую (эталонная фрикционная пара), а второй раз при вращении с подачей исследуемой смазки. Измеряя прирост силы трения $\Delta F_{\text{ЭКС}}$ на одинаковом угле поворота индентора $\Delta\varphi$, а также D_1 и D_2 – диаметры шаровых поверхностей и величины лунок d_1 и d_2 , рассчитывают коэффициент относительной адгезионной активности $K_{адг}$ по формуле:

$$K_{адг} = \frac{\Delta S_{исл}}{\Delta S_{эм}} = \frac{\Delta F_{\text{ЭКС}}^{исл} \cdot \tau_{cd}^{эм} \cdot S_{эм}}{\Delta F_{\text{ЭКС}}^{эм} \cdot \tau_{cd}^{исл} \cdot S_{исл}},$$

где $\tau_{cd}^{исл}$ и $\tau_{cd}^{эм}$ – прочность обрабатываемого материала в исследуемой и эталонной фрикционных парах на сдвиг, которая зависит от нагрузки и температуры (в нашем случае $\tau_{cd}^{исл} = \tau_{cd}^{эм}$);

$\Delta F_{\text{ЭКС}}^{исл}$ и $\Delta F_{\text{ЭКС}}^{эм}$ – прирост сил трения при одинаковом угле поворота $\Delta\varphi$ индентора для исследуемой и эталонной пар;

$S_{исл}$ и $S_{эм}$ – суммарная площадь лунок, образуемых на нижнем и верхнем образцах из обрабатываемого материала в исследуемой и эталонной парах.

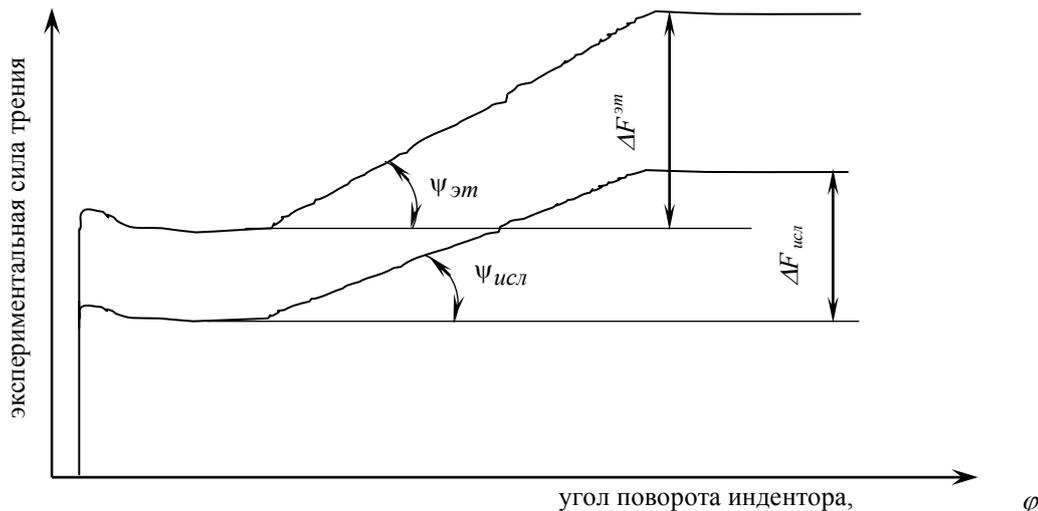


Рис. 2. К методике экспериментального определения сил трения в исследуемой и эталонной фрикционных парах

Выделение нерешенных частей

Рассмотренные методики имеют либо ограничения областей использования, либо позволяют получить только качественную оценку эффективности СОТС.

Поэтому в дополнение к ним в настоящей работе предлагается оригинальная методика, по которой в результате простейших расчетов можно определить такие параметры как коэффициент трения f и путь трения

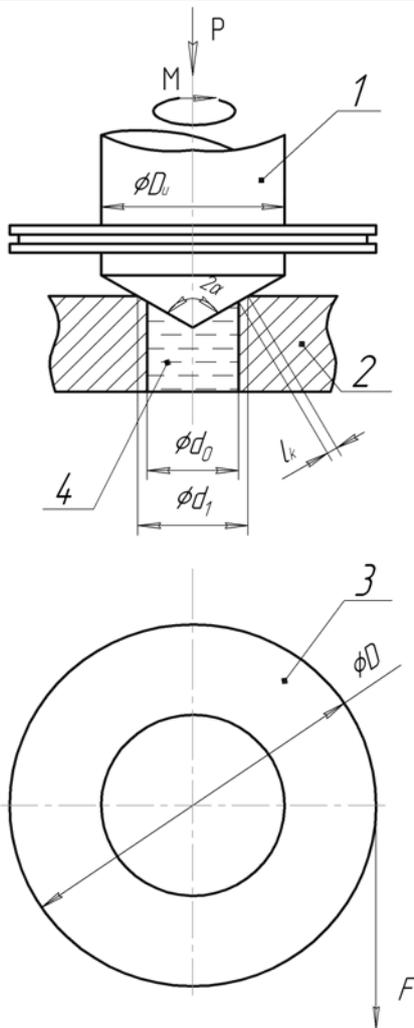


Рис. 3. Узел трения: 1 – образец из инструментального материала (индентор); 2 – образец из обрабатываемого материала; 3 – поворотный диск; 4 – смазочный материал

Тогда

$$M_{mp} = \frac{1}{8} \cdot \pi \cdot f \cdot l_k \cdot (d_1 + d_0)^2 \cdot \frac{2P}{l_k \cdot \sin \alpha \cdot \pi \cdot (d_1 + d_0)} = \frac{1}{4 \cdot \sin \alpha} \cdot f \cdot P \cdot (d_1 + d_0),$$

отсюда

$$f = \frac{4 \cdot M_{mp} \cdot \sin \alpha}{P \cdot (d_1 + d_0)}.$$

Экспериментально определяемая тангенциальная сила F (рис. 3), необходимая для вращения диска диаметром D с закрепленным в нем индентором, является суммарной. Индентор имеет две поверхности трения, поскольку зажат образцами сверху и снизу. В результате момент сил трения определяется как:

$$M_{mp} = \frac{F}{2} \cdot \frac{D}{2} = \frac{1}{4} \cdot F \cdot D,$$

и поэтому

$$f = \frac{F \cdot D \cdot \sin \alpha}{P \cdot (d_1 + d_0)}.$$

Если n – частота вращения, об/мин, то путь трения L_{mp} можно рассчитать как:

$$L_{mp} = n \cdot t_m \cdot \pi \cdot \frac{d_1 + d_0}{2},$$

где t_m – время в минутах.

Экспериментальная часть

Определение коэффициентов трения по предлагаемой методике количественной оценки трибологических свойств масел позволило получить более полное представление о влиянии смазочных материалов на поверхностях фрикционного контакта. Экспериментальные кривые в ходе проведения опытов имели вид отличный от кривых,

L_{mp} [6]. Идея методики состоит в том, что мы ограничиваем площадь контакта индентора с образцом, предварительно просверлив отверстие и снимая в нем фаску (рис. 3). Одним из главных преимуществ методики является то, что смазочный материал при вращении индентора, которое сопровождается его внедрением, постоянно подается на трущиеся поверхности. Однако, вместе с тем несколько осложняется техническая сторона вопроса подготовки к проведению самого опыта.

Контакт осуществляется поверхностью вращения по усеченному конусу малой высоты с длиной образующей равной

$$l_k = \frac{d_1 - d_0}{2 \sin \alpha}. \text{ Рекомендуемый угол } 2\alpha = 120^\circ.$$

В силу малости l_k $\left(\frac{l_k}{D_u} \cong \frac{1}{10} \right)$, распределение контактных

давлений p_n по ширине контакта l_k можно считать равномерным, т.е. можно принять $p_n = const$.

При данной схеме определения сопротивления относительно движению (сначала нагружение, а после вращение), сводятся к пренебрежимо малой величине сопротивления, обусловленные деформированием поверхностных слоев, т.е. деформационная составляющая.

Поэтому коэффициент трения, зависящий от величины контактного давления, определяется из соотношения

$$f = \frac{\tau_n}{p_n},$$

где τ_n – касательные напряжения.

Вращающий момент сил трения в силу малости l_k :

$$M_{mp} = \tau_n \cdot \pi \cdot \frac{d_1 + d_0}{2} \cdot l_k \cdot \frac{d_1 + d_0}{4} = \frac{1}{8} \cdot \pi \cdot f \cdot p_n \cdot l_k \cdot (d_1 + d_0)^2.$$

Контактное давление определяется из условий статики:

$$P = p_n \cdot l_k \cdot \sin \alpha \cdot \pi \cdot \frac{d_1 + d_0}{2},$$

откуда

$$p_n = \frac{2P}{l_k \cdot \sin \alpha \cdot \pi \cdot (d_1 + d_0)}.$$

полученных нами ранее при трении сферическим индентором (рис. 4).

Необходимо отметить интересный факт, связанный с явлением предварительных смещений (эффект Верховского) [7]. Наблюдаемое в начальный момент времени при трении на трибометре оно характеризует рубежное значение силы статического трения действующего при внедрении индентора. Непрерывное скольжение под влиянием внешней силы наступает в тот момент, когда сила необходимая для поворота диска с закрепленным в нем индентором станет больше этого рубежного значения.

С использованием предлагаемой методики эффект Верховского можно заметить только при трении всухую. Постоянная подача смазочного материала на поверхности трения приводят к тому, что трение протекает практически в условиях гидродинамической смазки.

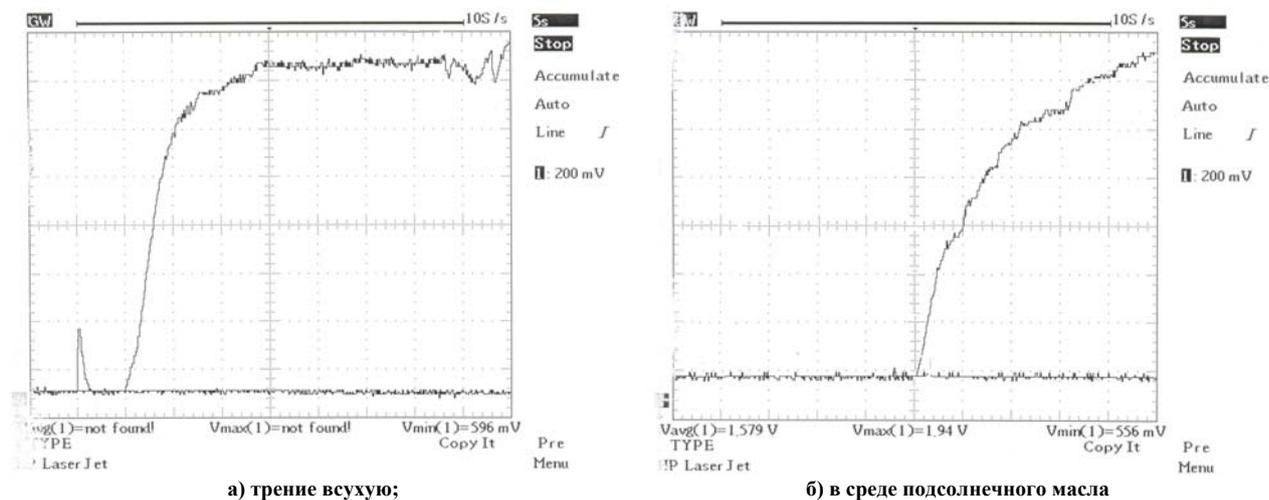


Рис. 4. Экспериментальные кривые, полученные с использованием конического индентора

На рис. 5 показаны зависимости изменения коэффициента трения от пути трения, представляющие собой математически обработанные экспериментальные кривые. В целом после пересчета коэффициентов внешний вид их изменился не сильно и по этим зависимостям можно получить дополнительные данные о смазочных свойствах СОТС.

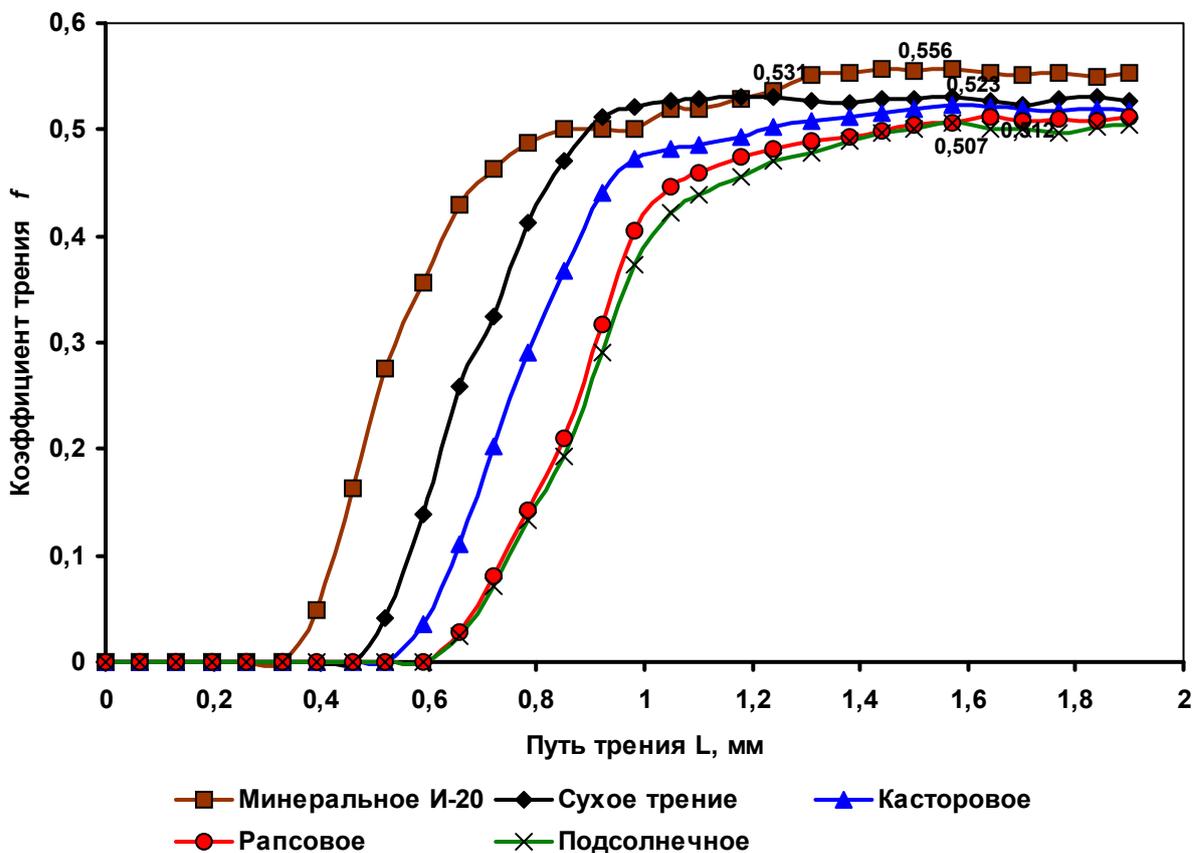


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения от пути трения во фрикционной паре P18 – ВТ1-0 при температуре цеха и нормальной нагрузке 882 Н

Во-первых, необходимо отметить появление горизонтального участка вначале испытания. По нашему

мнению он характеризует несущую способность смазочных пленок в трибосопряжении. У растительных масел горизонтальный участок экспериментальной кривой заметно длиннее, а значит смазочные пленки дольше сохраняют свою эффективность.

Во-вторых, кривая достаточно быстро достигает верхней полочки, когда рост силы трения прекращается и устанавливается баланс между образуемыми и срываемыми “мостиками” адгезионной сварки.

Как видно из табл. 1, влияние масел в контактной паре P18 – сталь 45 имеет более выраженный характер, нежели при трении по коррозионно-стойкой стали 08X18H10T и титановому сплаву BT1-0. При рассмотрении полученных значений более подробно, становится очевидной роль растительных масел в снижении трибонагруженности фрикционного узла и их эффективность относительно минерального масла. Также можно выделить растительные основы масляных СОТС наиболее приемлемые для каждой из фрикционных пар.

Таблица 1

Значения коэффициента трения в присутствии СОТС

	P18 – Сталь 45	P18 – 08X18H10T	P18 – BT1-0
Сухое трение	0,63	0,437	0,531
Минеральное И-20	0,34	0,418	0,556
Касторовое	0,185	0,388	0,523
Подсолнечное	0,207	0,346	0,507
Рапсовое	0,218	0,362	0,512

Выводы

Таким образом, принимаемый в качестве критерия оценки смазочных свойств масел максимальный коэффициент трения у растительных масел достигается по прошествии большего пути трения. Это свидетельствует о большей несущей способности смазочных пленок образуемых в среде биомасел.

Главным преимуществом данной методики является возможность сравнения коэффициентов трения, полученных в разных фрикционных парах между собой.

Литература

1. Внуков Ю.Н. Анализ современных взглядов на природу трения при резании материалов / Ю.Н. Внуков, Л.Г. Дюбнер // Вопросы механики и физики процессов резания и холодного пластического деформирования. К 100-летию проф. А.М. Розенберга. – К., 2002. – С. 136 – 148.
2. Трение, изнашивание и смазка : справочник в 2 т. / [под ред. И.В. Крагельского и В.В. Алисина]. – М.: Машиностроение, 1978 – Т.1. – 1978. – 400 с.
3. Михин Н.М. Исследование тангенциальной прочности адгезионной связи / Н.М. Михин, К.С. Ляпин, И.И. Добычин // Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа. – М.: Машиностроение, 1971. – С. 56–60.
4. Шустер Л.Ш. Адгезионное взаимодействие режущего инструмента с обрабатываемым материалом / Лева Шмульевич Шустер. – М.: Машиностроение, 1988. – 96 с.: ил.
5. Внуков Ю.Н. Повышение износостойкости быстрорежущих инструментов на основе исследования условий их трения с обрабатываемыми материалами и реализация новых технологических возможностей: дис. ... доктора техн. наук : 05.03.01 / Внуков Юрий Николаевич. – М., 1992. – 371 с.
6. Пат. 13014 Україна, МПК G01N 3/58. Спосіб вибору оптимального матеріалу, який використовується в парі тертя інструмент-деталь / А.І. Алієв – № u 200508082; Заявл. 16.03.2005; Опубл. 15.03.2006, Бюл. – № 3. – 5 с.
7. Дерягин Б.В. Что такое трение / Б.В. Дерягин // М.: Изд-во АН СССР, 1952. – 244 с.

References

1. Vnukov Yu.N. Analiz sovremennyh vzgljadov na prirodu trenija pri rezanii materialov / Yu.N. Vnukov, L.G. Djubner // Voprosy mehaniki i fiziki processov rezanija i holodnogo plasticheskogo deformirovanija. K 100-letiju prof. A.M. Rozenberga. – K., 2002. – S. 136 – 148.
2. Trenie, iznashivanie i smazka : spravochnik v 2 t. / [pod red. I.V. Kragel'skogo i V.V. Alisina]. – M.: Mashinostroenie, 1978 – T.1. – 1978. – 400 s.
3. Mihin N.M. Issledovanie tangencial'noj prochnosti adgezionnoj svjazi / N.M. Mihin, K.S. Ljapin, I.I. Dobychin // Kontaktное vzaimodejstvie tverdyh tel i raschet sil trenija i iznosa. – M.: Mashinostroenie, 1971. – S. 56–60.
4. Shuster L.Sh. Adgezionnoe vzaimodejstvie rezhushhego instrumenta s obrabatyvaemym materialom / Leva Shmul'evich Shuster. – M.: Mashinostroenie, 1988. – 96 s.: il.
5. Vnukov Yu.N. Povyshenie iznosostojkosti bystrorezhushchih instrumentov na osnove issledovanija uslovij ih trenija s obrabatyvaemymi materialami i realizacija novyh tehnologicheskikh vozmozhnostej: dis. ... doktora tehn. nauk : 05.03.01 / Vnukov Yurij Nikolaevich. – M., 1992. – 371 s.
6. Pat. 13014 Ukraїna, MPK G01N 3/58. Sposib vboru optimal'nogo materialu, jakij vikoristovuet'sja v pari tertja instrument-detall / A.I. Aliciev – № u 200508082; Zajavl. 16.03.2005; Opubl. 15.03.2006, Bjul. – № 3. – 5 s. [in Ukrainian]
7. Derjagin B.V. Chto takoe trenie / B.V. Derjagin // M.: Izd-vo AN SSSR, 1952. – 244 s.

Рецензія/Peer review : 28.10.2013 р. Надрукована/Printed :21.11.2013 р.

Рецензент: Якубов Ф.Я., д-р. техн. наук, проф., зав. кафедри технології машинобудування Республіканського вищого навчального закладу «Кримський інженерно-педагогічний університет»