

УДК 621.891

В. Б. СТРУТИНСКИЙ<sup>1</sup>, А. В. РАДИОНЕНКО<sup>2</sup>, Е. А. ИЩЕНКО<sup>1</sup><sup>1</sup>Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина<sup>2</sup>ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», Украина

### ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ НАПРАВЛЯЮЩИХ СТАНКОВ

*Разработана методика и проведены исследования пары трения полимер – чугун в сравнении с парой трения чугуна – чугуна. Выявлено влияние геомодификаторов на коэффициент трения скольжения и интенсивность приработки. Проведена оценка плавности хода по коэффициенту трения покоя.*

**Ключевые слова:** коэффициент трения, полимерный материал, геомодификаторы, плавность хода.

**Введение.** В последние годы все более широкое применение начинают получать технологии восстановления направляющих салазок суппортов металло-режущих станков с применением двухкомпонентных композитных материалов. Однако их использование в ремонтной практике и практике последующей эксплуатации требуют изучения характеристик этого материала, прежде всего при работе в паре трения с чугунными направляющими станка. В частности, изучения требуют такие параметры, как коэффициент трения скольжения, плавность хода, износостойкость и влияние на эти параметры современных смазочных материалов в сочетании с возможными добавками, улучшающими триботехнические показатели.

#### Постановка задачи и методика проведения экспериментов.

**Исследование коэффициента трения скольжения.** Экспериментальное определение коэффициента трения скольжения выполнялось на лабораторной установке – трибометре (рис. 1, 2) [1, 2].

Конструкция трибометра позволяет контролировать момент трения, суммарный линейный износ образца и контрообразца, температуру в зоне трения и толщину смазочной пленки. В качестве контрообразца используется гибкая стальная лента толщиной 0,06 мм.

Коэффициент трения при схеме «вал-лента» определяется по формуле, полученной из уравнения Эйлера:

$$f = \frac{\ln\left(\frac{6,66 \cdot W_{np}}{Q} + 1\right)}{\alpha}, \quad Q = \frac{N}{\sin(\alpha/2)},$$

где 6,66 – величина передаточного коэффициента, учитывающего соотношение диаметра образца  $d$  и плеча каретки  $A$  трибометра (рис. 3);  $N$  – усилие нагружения образца;  $Q$  – сила натяжения ленты;  $\alpha$  – угол охвата образца лентой;  $W_{np}$  – сила действия возвратных пружин каретки трибометра.

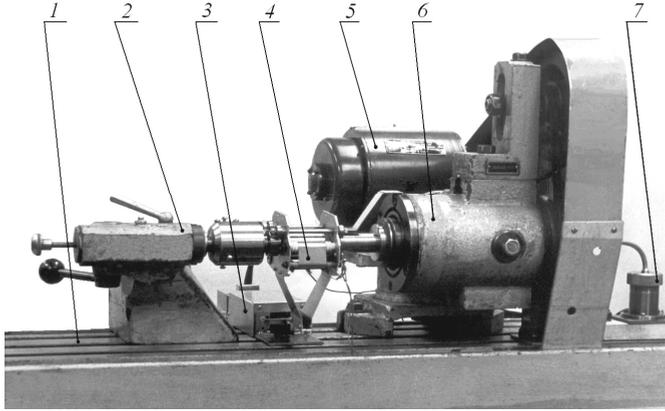


Рис. 1. Трибометр: 1 – станина; 2 – бабка заднего центра; 3 – датчик момента трения; 4 – каретка трибометра; 5 – электродвигатель привода; 6 – бабка ведущего центра; 7 – токосъемное устройство

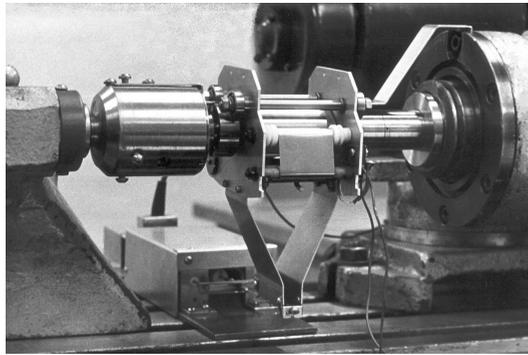


Рис. 2. Каретка трибометра

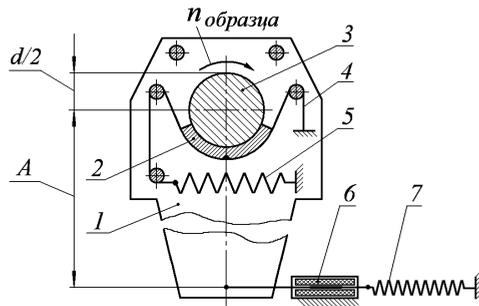


Рис. 3. Схема установки чугунного вкладыша: 1 – каретка трибометра; 2 – вкладыш; 3 – образец; 4 – стальная лента; 5 – пружины натяжения ленты; 6 – датчик угла поворота каретки; 7 – возвратные пружины каретки трибометра

Для исследования трения пары «полимер – чугун» или «чугун – чугун» необходимо в качестве контрообразца использовать вкладыш, который вырезался из чугунной втулки.

Вкладыш, вырезанный из чугунной втулки, устанавливался на образец под стальную ленту (рис. 3). Втулки изготавливались из чугуна марки АФМЖ.

Образцы применяемые в эксперименте выполнены в виде цилиндров, диаметром 30 мм, при этом образец из полимерного материала «моглайс» был получен по методике описанной в статье [1].

**Проверка расчетных формул для схем «вал-лента» и «вал-вкладыш».** Применимость формулы Эйлера для расчета коэффициентов трения при работе по схеме «вал-лента» и «вал-вкладыш» требовала проверки. С этой целью выполнено экспериментальное сравнение коэффициентов трения, рассчитанных исходя из формулы Эйлера и по классической формуле Амонтона – Кулона.

Также рассчитанные по этим формулам экспериментальные значения коэффициентов трения сравнивались с коэффициентами трения, полученными для аналогичных материалов трения другими исследователями и приведенными в различной литературе.

Для проведения сравнительного эксперимента были выбраны образцы диаметром  $d = 30$  мм из стали 45 твердостью  $HRC\ 30...32$ , шлифованные и доведенные алмазной пастой и, шлифовальной шкуркой до шероховатости  $R_a = 0,03...0,08$  мкм. Погрешность формы образцов не превышала 2 мкм. Если судить по пятну контакта на рабочей поверхности контрообразца после микроприработки, то контурная площадь контакта равнялась номинальной.

Контрообразцами служили металлическая лента и втулки из стали У8. Втулки и образцы тщательно притирались, а затем подвергались микроприработке. Шероховатость рабочей поверхности ленты и втулок после микроприработки соответствовала  $R_a = 0,15$  мкм.

Эксперименты измерения коэффициента трения производились с применением жидкого и твердого смазочного материала. При работе с маслом Индустриальное-20 режим трения устанавливался изменением скорости скольжения и соответствовал граничному, полужидкостному и жидкостному.

Твердым смазочным материалом служило покрытие на основе дисульфида молибдена марки ВНИИ НП-229. Удельная нагрузка на образец во всех случаях равнялась 0,61 МПа. Температура поддерживалась постоянной на уровне  $t = (33 \pm 2)$  °С. Рассчитанные коэффициенты трения приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Сравнение коэффициентов трения

Смазочный материал	Режим трения	Скорость скольжения, м/с	Коэффициенты трения			
			Схема трения «вал-лента»		Схема трения «вал-втулка»	
			$f_1$	$f_2$	$f_1$	$f_2$
Масло Индустриальное - 20	Граничное	$3,14 \cdot 10^{-2}$	0,085	0,205	0,072	0,186
	Полужидкостное	$7,85 \cdot 10^{-2}$	0,060	0,142	0,055	0,139
		$1,57 \cdot 10^{-1}$	0,031	0,072	0,026	0,064
Жидкостное	1,26	0,007	0,016	0,006	0,014	
Покрытие ВНИИ НП - 229	Твёрдая смазка	$6,28 \cdot 10^{-2}$	0,112	0,277	0,078	0,202

*Примечание.*  $f_1$  и  $f_2$  – коэффициенты трения, рассчитанные по формулам Эйлера и Амонтона – Кулона:

$$f_1 = \frac{\ell n \left( \frac{6,66 \cdot W_{np}}{Q} + 1 \right)}{\alpha}; \quad f_2 = \frac{F_{np}}{N} = \frac{6,66 \cdot W_{np}}{N},$$

где:  $W_{np}$  – сила возвратных пружин;  $Q$  – сила натяжения ленты;  $\alpha$  – угол охвата образца лентой;  $F_{np}$  – сила трения;  $N$  – усилие нагружения образца.

В литературе приводятся следующие значения коэффициентов трения стальных поверхностей при смазывании их жидким смазочным материалом и жидкостном трении –  $f = 0,005$ . Для граничного трения разными исследователями получены различные величины коэффициентов трения:  $f = 0,02...0,1$ , или  $f = 0,05...0,1$ , или  $f = 0,1...0,14$ .

Трение с твердым смазочным материалом на основе дисульфида молибдена характеризуется коэффициентами трения:  $f = 0,08...0,11$ ;  $f = 0,1$ ;  $f = 0,06$ .

Наиболее характерными значениями для коэффициентов трения являются: при трении с жидким смазочным материалом –  $f = 0,005...0,1$ , а для твердых смазочных материалов на основе дисульфида молибдена –  $f = 0,08...0,11$ .

Анализ величин коэффициентов трения, рассчитанных на основании экспериментальных данных, показывает, что, как для схемы трения «вал-лента», так и для схемы «вал-втулка» справедлива формула, полученная из уравнения Эйлера. Для обеих схем трения величины коэффициентов трения  $f$ , подсчитанные по формуле Амонтона - Кулона завышены по сравнению с указанными в литературе в 2,05 и 1,86 раза для граничной смазки и в 3,2 и 2,8 раза для жидкостной смазки, что показывает на невозможность применения этой формулы.

Для схемы трения «вал-втулка» применима формула Эйлера, а не Амонтона – Кулона т.к. усилие нагрузки на втулку создается по тому же принципу, что и в схеме «вал-лента», т.е. через ленту, огибающую втулку. Сила трения между образцом и втулкой стремится повернуть втулку, вследствие чего на ленту кроме силы нагружения действует и составляющая от силы трения. Проскальзывание между втулкой и лентой исключено за счет углубления на вкладыше и напаянного выступа на ленте (рис. 3). Углы охвата образца  $\alpha$  были разными, что учитывалось в расчетах.

Однако, коэффициенты трения, подсчитанные по формуле Эйлера для случая трения по схеме «вал-втулка» ниже, чем при трении по схеме «вал-лента» на 8,3...16%. Видимо, причина в неполном срабатывании механизма дополнительного натяжения ленты за счет силы трения из-за повышенного трения в местах изгиба стальной ленты.

**Результаты исследования.** Коэффициенты трения замерялись при трении по схемам «вал-лента» и «вал-втулка» на скорости скольжения 0,94 м/мин. На образец наносился тонкий слой смазочного масла «Индустриальное 20». В процессе экспериментов выполнялись замеры каждые 5 минут работы установки. Результаты определения коэффициента трения после пересчета показаний стрелочного прибора в значения коэффициента трения показаны на рис. 4.

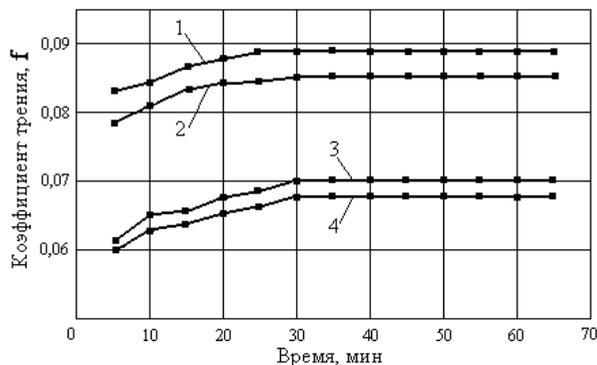


Рис. 4. Коэффициенты трения для различных пар скольжения: 1 – сталь-сталь; 2 – сталь-моглайс; 3 – чугун-чугун; 4 – чугун-моглайс. Схемы трения: 1, 2 – «вал – лента», 3, 4 – «вал – втулка»

При сравнении результатов экспериментов следует отметить, что применение полимерного материала «моглайс» снижает коэффициент трения, как при трении со стальной лентой, так и при трении с чугунным вкладышем.

При трении по схеме «вал – втулка» зафиксированы более низкие коэффициенты трения, что и было показано при сравнительном эксперименте.

**Влияние геомодификаторов на коэффициент трения скольжения и шероховатость.** При трении по схеме «вал-лента» проведена оценка влияния геомодификаторов на коэффициент трения скольжения и интенсивность приработки поверхности образцов. На рис. 5 показаны зависимости коэффициента трения от содержания геомодификаторов в масле «Индустриальное 20».



Рис. 5. График зависимости коэффициента трения от процентного содержания геомодификатора: 1 – геомодификатор GMT-Y-1/3; 2 – геомодификатор GMT-Y-1/30

Как было установлено, 5 % содержание геомодификатора дает незначительное снижение коэффициента трения, в то время как уже 10 % - существенно снижает коэффициент трения. Дальнейшее увеличение содержания геомодификатора в масле не приносит существенного изменения в сравнении с 10% содержанием, и учитывая достаточно высокую его стоимость, можно рекомендовать содержание его не более 10 %. Проверка полученных результатов на сортах масла «Индустриальное 20» и турбинное подтвердила эффект снижения коэффициента трения в пределах на 60-70 %.

Образцы №1 и 3 испытывались с добавлением геомодификатора GMT-Y- 1/3 в масло индустриальное 20, образец №2 с GMT-Y 1/30 и турбинным маслом.

Шероховатость образцов измерялась по профилограммам, записанным с помощью профилографа – профилометра. Шероховатость поверхности образцов из материала «моглайс» значительно снижается (табл. 2).

Таблица 2

#### Изменение шероховатости поверхности

№ образца (время испытаний)	шероховатость поверхности перед испытанием, $R_z$ , мкм	шероховатость поверхности после испытания, $R_z$ , мкм
1 (испытание 13 часов)	3,2	1,3
2 (испытание 6 часов)	3,2	1,6
3 (испытание 4 часов)	3,2	2,0

**Исследование коэффициента трения покоя.** Одним из триботехнических параметров, характеризующих работу металлорежущего станка на малых скоростях скольжения, является плавность перемещения суппорта. Плавность хода зависит от коэффициента трения покоя (страгивания). Экспериментальное изу-

чение коэффициента трения покоя в момент страгивания для материала «моглайс» выполнялось на лабораторной установке, показанной на рис. 6.

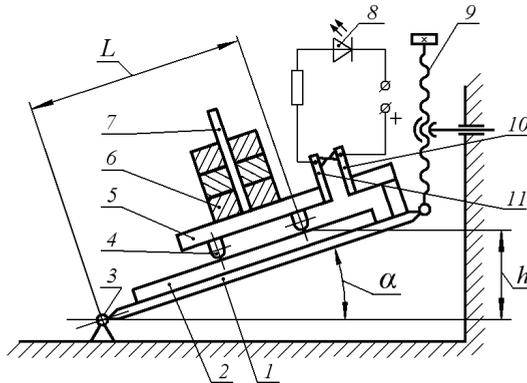


Рис. 6. Кинематическая схема лабораторной установки: 1 – подъемный стол; 2 – плита сменная; 3 – шарнир; 4 – сферические ножки; 5 – тележка; 6 – грузы; 7 – штырь; 8 – светодиод; 9 – винтовой механизм; 10 – неподвижный электрический контакт; 11 – электрический контакт на тележке

Подъемный стол 1 со сменной плитой 2 может вращаться вокруг шарнира 3. На плите 2 на трех сферических ножках 4 помещалась тележка 5. Радиус сферы ножек, изготовленных из материала «моглайс», – 4 мм. Тележка 5 нагружалась грузами 6, размещенными на штыре 7. На тележке установлен электрический контакт 11, находящийся в одной цепи с неподвижным контактом 10. В электроцепь включен светодиод 8. Угол  $\alpha$  подъема стола 1 регулируется с помощью винтового механизма 9. На данной лабораторной установке имеются линейки, позволяющие контролировать размеры  $h$  и  $L$ .

Увеличивая винтом 9 угол  $\alpha$  приводили тележку 5 в движение. Момент страгивания тележки фиксировался по прекращению свечения светодиода 8 в момент размыкания контактов 10 и 11. После размыкания контактов 10 и 11 замерялись по линейкам величины  $h$  и  $L$  и подсчитывался коэффициент трения страгивания.

Коэффициент трения рассчитывался для момента страгивания по формуле:

$$f = \operatorname{tg} [\arcsin (h/L)]$$

где  $h$  – высота подъема пластины;  $L$  – размер, определяющий положение каретки.

Результаты экспериментов представлены на рис. 7.

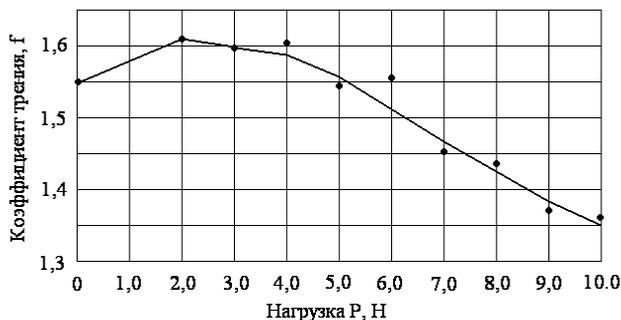


Рис. 7 Зависимость коэффициента трения покоя  $f$  от нагрузки  $P$

Начальное увеличение коэффициента трения покоя по мере увеличения нагрузки, можно объяснить увеличением фактической площади контакта сферических образцов с поверхностью шлифованной пластины. Дальнейшее снижение коэффициента трения при возрастании нагружения объяснить затруднительно и требует дополнительных исследований.

**Выводы.** В результате экспериментальных лабораторных испытаний определен ряд триботехнических характеристик материала «моглайс». Найдены коэффициенты трения скольжения при трении по стали и чугуна, выявлено влияние геомодификаторов на коэффициент трения скольжения и на изменение шероховатости поверхности образцов, оценена плавность хода. Данные триботехнические характеристики материала «моглайс» могут быть использованы при восстановлении направляющих станков с помощью полимерных материалов и определении оптимальных значений режимов их эксплуатации.

#### Список литературы

1. Ищенко А. А. Исследование и применение полимерного материала «моглайс» для восстановления направляющих поверхностей салазок суппортов металлорежущих станков / Ищенко А. А., Радионенко А. В., Ищенко Е. А. // Проблемы тертя та зношування. – 2014. – № 1 (62). – С. 23–29.
2. Радионенко А. В. Трибометр для исследования влияния качества поверхностей на состояние смазочной пленки / А. В. Радионенко // Машиноведение. – 1987. – № 6. – С. 93 – 97.

Стаття надійшла до редакції 26.05.2015

*В. Б. СТРУТИНСЬКИЙ, О. В. РАДІОНЕНКО, О. А. ІЩЕНКО*

### **ТРИБОТЕХНІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ, ЯКІ ВИКОРИСТОВУЮТЬ ПІД ЧАС ВІДНОВЛЕННЯ НАПРАВЛЯЮЧИХ ВЕРСТАТІВ**

Розроблена методика, оснащення та проведені дослідження пари тертя полімер-чавун в порівнянні з парою тертя чавун-чавун. Виконано експериментальне порівняння застосування формул Ейлера і Амонтон-Кулона для розрахунку коефіцієнта тертя для пари тертя «вал-втулка» і «вал-стрічка». Виявлено вплив геомодифікаторів на коефіцієнт тертя ковзання та інтенсивність приробітку. Спроектовано лабораторну установку і проведено оцінка плавності ходу за коефіцієнтом тертя спокою.

**Ключові слова:** коефіцієнт тертя, полімерний матеріал, геомодифікатори, плавність ходу.

---

*V. B. STRUTINSKII, A. V. RADIONENKO, E. A. ISHCENKO*

**TRIBOLOGICAL STUDY OF POLYMER COMPOSITES WHICH  
ARE APPLIED AT THE RESTORATION OF GUIDES  
OF MACHINE TOOLS**

It was developed a method, equipment and conducted research of a pair of friction polymer-cast iron comparing with a pair of cast-iron – cast-iron friction. It was achieved an experimental comparison of the applicability of the Euler formulas and Amonton-Coulomb to calculate the coefficient of friction of friction pair "shaft-hub" and "shaft-belt." It was designed laboratory facility revealed the effect of geomodifiers sliding friction coefficient and intensity of the running. It was estimated the smooth ride of the machine carriage by the coefficient of static friction.

**Keywords:** the coefficient of friction, polymeric material, geomodifiers, smooth ride

**Струтинский Василий Борисович** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Металлорежущие станки и системы», Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», просп. Победы, 37, корп. 1, к. 232, г. Киев, Украина, 03056, тел.: +38 044 454 94 61, E-mail: kvm\_mmi@mail.ru.

**Радионенко Александр Васильевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», ул. Университетская, 7, г. Мариуполь, Украина, 87500, тел.: +38 0629 44 65 89, E-mail: a.v.radionenko@yandex.ru.

**Ищенко Елена Анатольевна** – аспирантка кафедры «Металлорежущие станки и системы», Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», просп. Победы, 37, корп. 1, к. 232, г. Киев, Украина, 03056, тел.: +38 044 454 94 61, E-mail: ischenko49@mail.ru.