

МАШИНОВЕДЕНИЕ, СИСТЕМЫ ПРИВОДОВ И ДЕТАЛИ МАШИН

УДК 621.8.031.6

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ГИПОТЕЗ О ПРИРОДЕ ТРЕНИЯ

Легаев В.П. *, Генералов Л.К. **, Галковский О.А. ***

*Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых,
ВлГУ, ул. Горького, 87, Владимир, 600000, Россия*

** e-mail: legaev@vlsu.ru*

*** e-mail: generalov@vlsu.ru*

**** e-mail: ogvlsu@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 11.04.2018

В рамках выполнения научно-исследовательской работы проведено классическое исследование по определению законов изменения коэффициента трения и факторов, влияющих на него. Силу трения F_T фрикционной пары определяют: давление, скорость скольжения, теплофизические и механические свойства материалов, при этом фрикционно-износные характеристики и механические свойства пары трения находятся в различных нелинейных функциональных зависимостях от режима трения и, в первую очередь, от теплового режима работы пар трения.

Ключевые слова: трение, коэффициент трения, сила трения.

Аэрокосмическая отрасль традиционно считается одной из наиболее наукоемких и высокотехнологичных отраслей, влияющей на большинство секторов отечественной промышленности. Высокие эксплуатационные требования, предъявляемые к аэрокосмическому сектору, обуславливают развитие смежных областей промышленности, таких, как машиностроение и технология материалов.

В рамках выполнения научно-исследовательской работы, целью которой является улучшение эксплуатационных параметров прецизионных

машин, поставлена задача определения законов изменения коэффициента трения и факторов, влияющих на него. Пара трения представляет собой металлическое тело и полимерное контртело на основе эпоксидной смолы с антифрикционными добавками.

Представления о природе трения формируются в мировом научном сообществе с конца XV века и условно могут быть разделены на четыре группы, соответствующие действующей парадигме: геометрическую, молекулярную (адгезионную), деформационную, комбинированную [1].

Первые научные работы по трибологии обнаружены в записях Леонардо да Винчи, содержащих много правильных утверждений, таких, как указание на пропорциональность сопротивления трения нагрузке на трущиеся поверхности тел и на наличие большего сопротивления трения шероховатых поверхностей. Таким образом, закон, согласно которому сила трения прямо пропорциональна нагрузке, т. е. $F = fN$, был открыт Леонардо да Винчи, считавшим, что коэффициент трения f обычно равен 0,25.

В 1699 году Г. Амонтоном был переоткрыт закон трения и выведено утверждение о неизменности коэффициента трения, равного 0,3[3].

В 1778 году Д. Деагюлье первым предложил двухчленную формулу:

$$F = A + BN, \tag{1}$$

где A — характеристика сцепленности, не зависящая от нагрузки [3].

С середины XVIII века прослеживается идея о различии коэффициента трения для различных сочетаний металлов.

На данный момент распространенным является представление об адгезионно-деформационной природе трения [1, 2, 4] и физика протекания процесса внешнего трения имеет следующий вид. При сдвиге контактирующих твердых тел вследствие деформации этих тел увеличивается сила внешнего трения, данное явление названо предварительным смещением. Сила трения, соответствующая наибольшему предварительному смещению, является силой трения покоя $F_{Тп}$.

При достижении равенства силы трения покоя и силы трения скольжения происходит необратимое перемещение одного из контактирующих твердых тел по поверхности другого, при этом внешняя сила по величине равна силе трения скольжения $F_{Тск}$ (рис. 1)[2].

А.В. Чичинадзе определил процесс трения в общем виде как «высокие реализуемые давления на дискретных фактических контактах в сочета-

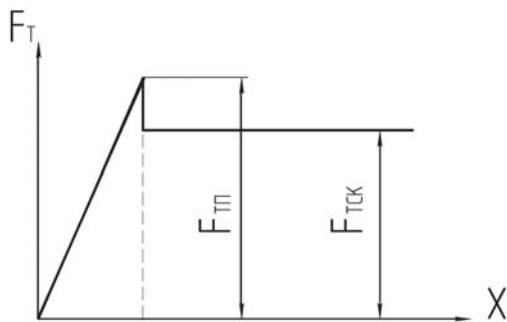


Рис. 1. Зависимость силы внешнего трения F_T от перемещения x

нии со значительной скоростью относительного перемещения трущихся тел.

Этим обусловлено значительное повышение температуры в зоне контакта, что приводит к существенным изменениям (с учетом влияния среды) свойств поверхностных слоев, значительным механическим и температурным напряжениям в микро- и макрообъемах, которые способствуют протеканию химических процессов с образованием вторичных соединений и структур, активизируют взаимную диффузию и существенно меняют молекулярную составляющую силы трения» [2].

Сила трения, с учетом молекулярной составляющей, определяется выражением

$$F_T = F_{Т\text{ мол}} + F_{Т\text{ мех}}, \tag{2}$$

где $F_{Т\text{ мол}}$ — молекулярная составляющая силы трения; $F_{Т\text{ мех}}$ — механическая (деформационная) составляющая силы трения [2].

При этом «сила трения есть сила сопротивления при относительном перемещении одного тела по поверхности другого под действием внешней силы, тангенциально направленная к общей границе между этими телами» [5].

Фрикционное взаимодействие происходит лишь на отдельных участках номинального контакта. Эти участки при скольжении разрушаются и вновь образуются. Таким образом, во фрикционном контакте присутствует отдельное физическое тело, обладающее особыми свойствами и названное «третьим телом» [1]. Данное тело представляет собой совокупность одновременно существующих фрикционных связей и большей частью является дискретным.

«Особенностью этого третьего тела является то, что при скольжении непрерывно происходит разрушение и формирование элементов, его образующих. Сила, затрачиваемая на разрушение при скольжении, равна силе трения. Ее отношение к нормальной нагрузке является коэффициентом трения скольжения.

Измененный тонкий поверхностный слой испытывает большие деформации, его свойства в сочетании с объемными свойствами определяют износостойкость и сдвиговые сопротивления» [1].

Значительные контактные напряжения, возникающие на фактических площадках контакта, приводят к появлению реологических процессов во фрикционном контакте. При этом происходит течение материала, приводящее к заглублению единичных инденторов в деформируемое контртело, что, соответственно, приводит к возрастанию силы трения.

И.В. Крагельский совместно с Н.М. Михиным предложил аналитическую модель зависимости между предварительным смещением и факторами, на него влияющими, применительно к пластическому контакту [1].

При пластическом контактировании предполагается, что жесткая шероховатая поверхность, моделированная в виде сферических выступов одинакового радиуса, внедряется в абсолютно гладкую пластически деформируемую поверхность. Предполагаются два этапа контактирования: первый — под действием только нормальной нагрузки (неподвижный контакт), второй — под действием нормальной и тангенциальной нагрузок (предварительное смещение).

При приложении i -й нормальной нагрузки неровность под влиянием силы N_i будет углубляться, пока напряжение на контакте не сделается равным твердости $c\sigma_s$. Глубина внедрения

$$h_i = \frac{N_i}{2\pi R_i c\sigma_s}, \quad (3)$$

где R_i — радиус внедрившейся неровности;

$c\sigma_s = q_r$ — среднее напряжение на контакте;

σ_s — предел текучести материала;

c — коэффициент формы по А.Ю. Ишлинскому.

При заглублении данная неровность охватывается деформируемым материалом равномерно со всех сторон (рис. 2). Приложение тангенциальной нагрузки вызывает увеличение напряжений со стороны действия тангенциальной силы. При этом движение сферической неровности оттесняет

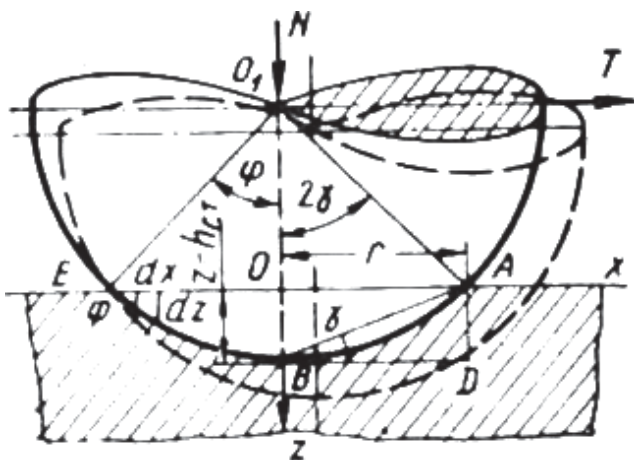


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая контактное предварительное смещение единичного сферического индентора

материал, а силы N и T будут действовать только на переднюю полуповерхность AB .

Рассмотрение аналитической модели Крагельского позволяет предположить, что среднее напряжение на контакте $q_{кин}$ приблизительно равно среднему напряжению $q_{ст}$ в неподвижном состоянии. Рост сопротивления тангенциальной силе обусловлен оттеснением материала сферическим индентором и, как следствие, перераспределением сил в контакте. Данное явление обуславливает значение силы трения покоя и характер ее роста и названо «предварительным смещением» [1].

Полная сила трения покоя есть граничная точка перехода трения предварительного смещения в трение скольжения (движения). А трение движения есть трение двух тел, находящихся в движении друг относительно друга [5].

По И.В. Крагельскому, «трение движения имеет двойственную молекулярно-механическую природу. Оно обусловлено объемным деформированием материала и преодолением межмолекулярных связей (мостиков холодной сварки), возникающих между сближенными участками трущихся поверхностей».

При этом объемное деформирование неминуемо. Вследствие того что поверхности всегда волнисты, шероховаты и неоднородны по своим механическим свойствам, происходит внедрение более жестких элементов поверхностей в более мягкое контртело. Внедрившийся элемент, перемещаясь в тангенциальном направлении, деформирует нижележащий материал, образуя впереди индентора полусферический валик, который подминается и раздвигается в стороны.

Величина валика зависит от относительного внедрения и прочности межмолекулярных связей, которые неминуемо образуются между пленками, покрывающими поверхности» [1].

При протекании процесса трения важно различие между прочностью адгезионной связи и прочностью нижележащих слоев. При преобладании прочности нижележащих слоев над прочностью связи фрикционной пары имеет место положительный градиент механических свойств:

$$\frac{d\sigma_x}{dz} > 0, \quad (4)$$

где σ_x — разрушающее напряжение в направлении плоскости касания;

z — координата, перпендикулярная к плоскости касания.

Данное явление обуславливает процесс внешнего трения, при этом все напряжения и деформационные силы сосредоточены в поверхностном слое.

Преобладание прочности связи фрикционной пары над прочностью нижележащих слоев, т.е.

$\frac{d\sigma_x}{dz} < 0$, обуславливает процесс внутреннего трения, при котором происходят значительные деформации и разрушения внутренней области тел фрикционной пары.

Правило положительного градиента всегда осуществляется при нормальном процессе трения.

Тела фрикционной пары при внешнем трении соприкасаются по фактической площади контакта, т.е. относительное перемещение тел происходит по отдельным участкам номинальной площади контакта. Увеличение приложенной нормальной нагрузки вызывает заглубливание данных участков и увеличение фактической площади.

Участвующие в процессе трения факторы можно охарактеризовать тремя основными категориями: сочетание материалов, конструкция фрикционной пары, режим работы [1].

Для выполнения правила положительного градиента во фрикционном контакте необходима или пленка смазки, или пленка окисла, или пленка мягкой составляющей. С увеличением пленки рост ее замедляется [1].

При этом понижается до известного предела и коэффициент трения. Очень толстые пленки повышают коэффициент трения, так как процесс переходит в саму пленку [1].

Во фрикционном контакте при относительном движении происходит деформация поверхностных слоев тел. При этом выделяется определенное количество тепловой энергии, распространяющейся также и вглубь материала и способной привести к местному размягчению или расплавлению материала поверхностного слоя.

А.В. Чичинадзе предложил важную конструктивную характеристику узла трения, названную коэффициентом взаимного перекрытия:

$$K_{вз} = A_{a1} / A_{a2}, \quad (5)$$

где A_{a1} — номинальная площадь трения первого элемента; A_{a2} — номинальная площадь трения второго элемента, при этом $A_{a2} \leq A_{a1}$.

Форма, размеры узла трения и величина $K_{вз}$ существенно влияют на коэффициент трения. Особенно это относится к действию окружающей среды (газовой и жидкой) на фрикционный кон-

такт, что неизменно приводит к изменению физико-химических и механических свойств поверхности трения и к изменению коэффициента трения и интенсивности изнашивания.

Большое влияние на силу и коэффициент трения оказывают продукты износа и их нахождение или удаление с поверхности трения. При трении полимерных материалов в паре с металлами удаление частиц износа из зоны трения снижает коэффициент трения на 15...20 %, а износ — в несколько десятков раз [2].

Этот параметр учитывает наряду с другими определяющими факторами (давлением, скоростью скольжения, теплофизическими и механическими свойствами материалов) условия теплопередачи. Величина $K_{вз}$ определяет среднюю температуру поверхностей трения $\theta_{1,2}^*$, объемную температуру $\theta_{V1,2}$, температурный градиент по нормали к

поверхности трения $\left(\frac{\partial\theta}{\partial z}\right)_{1,2}$. Снижение $K_{вз}$ приводит к снижению средней температуры θ^* и воз-

растанию градиента температуры $\frac{\partial\theta}{\partial z}$. Этот эффект

достигается при нормальном давлении $p_a = \text{const}$ и скорости скольжения $v_{ск} = \text{const}$. Седствием этих изменений является возрастание коэффициента трения f_T и снижение интенсивности изнашивания.

Как следует из молекулярно-механической теории внешнего трения и усталостной теории изнашивания твердых тел И.В. Крагельского, «фрикционно-износные характеристики и механические свойства материалов пар трения находятся в различных нелинейных функциональных зависимостях. При этом эти зависимости могут существенно меняться от режима трения и, в первую очередь, от теплового режима работы пар трения.

Важнейшей характеристикой температурного режима трения является градиент температуры по

нормали к поверхности трения $\frac{\partial\theta^*}{\partial z}$ (где θ^* —

средняя температура номинальной поверхности трения; z — координата в направлении нормали к поверхности трения). Температурный градиент влияет на градиент механических свойств контактирующих материалов, а следовательно, на коэффициент трения и износ» [2].

Существенно влияет на силу и коэффициент трения конструкция узла трения. С узлом связаны номинальная A_n , контурная A_c и фактическая площади трения A_r , коэффициент взаимного перекрытия $K_{вз}$, форма и размеры контактирующих элементов, их жесткость и эластичность, входящие в число основных параметров, определяющих трение. Вместе с этим увеличивается изнашивание, обусловленное режимом трения и свойствами триботехнических материалов.

Трение движения имеет двойственную молекулярно-механическую природу, и вследствие того что поверхности всегда волнисты, шероховаты и неоднородны по своим механическим свойствам, происходит внедрение более жестких элементов поверхностей в более мягкое контртело.

Соответственно, скорость v движения индентора определяет силу трения. При этом увеличение нагрузки на отдельно выбранный индентор приводит к увеличению силы трения, однако в реальных условиях эксплуатации пары трения силы реакции опоры N воздействуют по площади фактического контакта A_r , зависящей от нагрузки. Увеличение площади фактического контакта снижает удельную нагрузку, т.е. зависимость силы трения от скорости относительного движения пары трения и нагрузки не линейна и обусловлена свойствами материалов.

Выводы

Теоретические и эмпирические исследования процессов трения указывают на то, что воздействие факторов, влияющих на коэффициент трения покоя и коэффициент трения скольжения, не одинаково. Это в равной степени касается процессов трения полимеров и металлов, при исследовании которых необходимо учитывать следующее:

1. В основе исследования процессов трения полимерных и металлических материалов следует использовать адгезионно-деформационную теорию трения, включающую определение молекулярных и механических составляющие сил трения.

2. По известной силе трения фрикционной пары определяют давление, скорость скольжения, теплофизические и механические свойства материалов.

3. Следует соблюдать правило положительного градиента и обеспечивать во фрикционном контакте пленки смазки, пленки окисла или пленки мягкой составляющей.

4. Следует контролировать площадь контактирующих поверхностей при заданных микронеровностях и силы трения покоя для определения точки перехода к трению скольжения.

5. Следует учитывать формы и размеры узла трения, а также коэффициент взаимного перекрытия при определении коэффициента трения.

Библиографический список

1. Крагельский И.В. Трение и износ. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1968. — 480 с.
2. Чичинадзе А.В. Браун Э.Д., Буше Н.А. и др. Основы трибологии: трение, износ, смазка / Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. — 2-е изд., переработ. и доп. — М.: Машиностроение, 2001. — 664 с.
3. Хебда М., Чичинадзе А.В. Справочник по триботехнике. — В 3 томах. — М.: Машиностроение, 1989. Т. 1: Теоретические основы. — 400 с.
4. Кузнецов В.Д., Лоскутов А.И., Коган Ю.И. Влияние смазок на процесс царапания металлов // Известия вузов. Физика. 1957. №1. С. 32-35.
5. ГОСТ 27674-88 Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения. — М.: Издательство стандартов, 1988. — 16 с.
6. Билялетдинова Л.Р., Стеблинкин А.И. Математическое моделирование электромеханического рулевого привода с шариковинтовой передачей с учетом нелинейностей типа «сухое трение» и «люфт» // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 3. С. 95-108.
7. Фирсанов В.В. Метод расчета напряженно-деформированного состояния упругих стержневых систем с односторонними связями и трением в скользящих парах // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17. № 4. С. 30-39.
8. Ахметова Е.Р., Тазетдинов Р.Г. Модификация титановых сплавов для пар трения методом периодического разряда в потоке жидкости // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 1. С. 73-83.
9. Фролов К.В. Современная трибология: итоги и перспективы. — М.: Издательство ЛКИ, 2008. — 480 с.
10. Popov V.L. Contact Mechanics and Friction // Physical Principles and Applications. — Berlin: Springer-Verlag, 2010. — 362 p.
11. Попов В.Л., Димаки А.В. Зависимость «статического» коэффициента трения эластомера от времени // Физическая мезомеханика. 2012. Т. 15. № 3. С. 55-57.
12. Поляков С.А. Самоорганизация при трении и эффект безыносности. Диссипативная морфология и наноструктурный синтез. — М.: РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева, 2009. — 107 с.
13. Поляков С.А., Гончаров С.Ю., Захаров М.Н., Лычагин В.В. Повышение энергоэффективности и надежности червячных передач оптимизацией подбора смазочных материалов по ускоренным испытаниям // Вестник машиностроения. 2015. №1. С. 54-57.
14. Петрова П.Н., Аргунова А.Г., Исакова Т.А. Разработка триботехнических материалов на основе поли-

- тетрафторэтилена // Вестник машиностроения. 2015. № 8. С. 67-70.
15. Okhlopkova A.A., Petrova P.N., Gogoleva O.V. Investigation of the triboengineering characteristics of nanocomposites based on polymeric blends // Journal of Friction and Wear. 2009. Vol. 30. No. 5, pp. 363-368. DOI: 10.3103/S1068366609050109
 16. Дроздов Ю.Н., Юдин Е.Г., Белов А.И. Прикладная трибология (трение, износ, смазка) / Под ред. Ю.Н. Дроздова. — М.: Эко-Пресс, 2010. — 603 с.
 17. Поляков С.А., Куксенова Л.И., Лычагин В.В., Гончаров С.Ю. Методические основы подбора сочетаний конструкционных и смазочных материалов для узлов, работающих в условиях трения скольжения // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2013. № 8. С. 29-36.
 18. Кристал М.А., Пигузов Ю.В., Головин С.А. Внутреннее трение в металлах и сплавах: Учебное пособие. — М.: Металлургия, 1964. — С. 44 (120 с.)
 19. Маленко П.И. Исследование температур на дискретных субшероховатых поверхностях при трении скольжения со смазочным материалом // Вестник машиностроения. 2011. № 7. С. 38—42.
 20. Дроздов Ю.Н., Маленко П.И. Структурно-фазовые превращения в поверхностных слоях сталей при трении скольжения // Трение и износ. 2014. Т. 35. № 1. С. 87—98.

AN ANALYTICAL REVIEW OF EXISTING HYPOTHESES ABOUT THE PHYSICS OF FRICTION

Legaev V.P.* , Generalov L.K. , Galkovskii O.A.*****

*Vladimir state University named after Aleksander i Nikolay Stoletovs,
87, Gorky str., Vladimir, 600000, Russia*

* e-mail: legaev@vlsu.ru

** e-mail: generalov@vlsu.ru

*** e-mail: ogvlsu@mail.ru

Abstract

Assigned the task to determine the laws of change in the coefficient of friction and determine the factors affecting it as part of the research work. The purpose of this work is to improve the performance parameters of precision machines.

Physics of the external friction process has the next form. When the contacting solids are shifted, the external friction force increases due to deformation of these solids, this phenomenon is called preliminary displacement. Static friction force F_s is the force of friction, corresponds the highest value of the preliminary displacement. One of the contacting solids moves irreversibly (slides) across the surface of another solid after a static friction force has been achieved, in

this case the external force is equal to the kinetic friction force F_k [2].

Friction interaction occurs in certain parts of the nominal contact only. Friction interaction is the third solid. The complete complex of frictional links forms a frictional interaction, which is discrete [1].

The preliminary displacement is caused by the redistribution of the contact irregularities in the support surface [1].

The total static friction force is the boundary point, under which preliminary displacement friction passes to kinetic friction force.

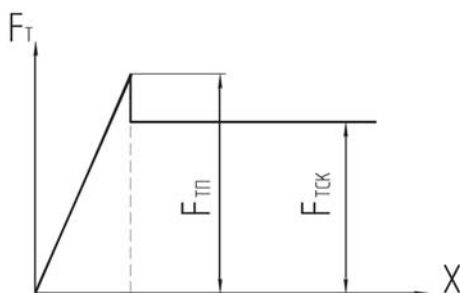
Kinetic friction is the friction of two solids that are in motion relative to each other [4].

Kinetic friction has a dual molecular-mechanical nature. It is caused by volumetric deformation of the material and overcoming intermolecular bonds

$$F_f = F_{fm} + F_{fd}$$

where F_{fm} - is the molecular component of the friction force; F_{fd} - is the mechanical (deformation) component of the friction force [2].

If the adhesion bond is less strong than the underlying layers, then there is a positive gradient of mechanical properties at depth:



Relation of external friction force F to the movement x

$$\frac{d\sigma_x}{dz} > 0 \quad (1)$$

where σ_x - destructive stress aimed at the contact surface;

z - coordinate perpendicular to the contact surface.

If $\frac{d\sigma_x}{dz} > 0$, then friction modify into force that

destroys the contact surface.

Under normal friction process, the positive gradient rule is always come true.

The contact is always discrete and the area external friction depends on the applied load at external friction. Contact surface is continuous and independent on the applied load at internal friction.

The coefficient of friction depends on three factors almost equally: combination of materials; construction of friction pair; operating mode [1].

To execute the rule of positive gradient must be present lubrication film in the friction contact, or oxide film, soft components film [1].

The growth of the film slows down with increasing its thickness [1].

The growth of the film reduces the coefficient of friction to a known limit. Very thick films increase the coefficient of friction [1].

The relative sliding of two solids produces heat in a thin surface layer. The temperature rising can lead to local softening and melting of the material. The temperature field leads to a change in the mechanical properties of the material in a thin surface layer. The intensity of the heat flow depends on the friction work and the size of the area on which it is generated [1].

Important constructive characteristics of the friction units is the coefficient of mutual overlap, proposed by A.V. Chichinadze,

$$K_{ov} = A_{a1} / A_{a2} \quad (2)$$

where A_{a1} - the nominal friction area of the first element; A_{a2} - the nominal friction area of the second element; $A_{a2} \leq A_{a1}$.

Wear products have a great impact on the strength and coefficient of friction [2].

Friction and wear characteristics and mechanical properties of friction pairs materials are in various nonlinear functional dependencies. At the same time, these dependencies can significantly change from the friction mode and from the thermal mode of friction pairs.

The construction of the friction unit significantly affects the force and coefficient of friction. In this regard, the nominal A_a , contour A_c and actual areas

of friction A_f , the coefficient of mutual overlap K_{ov} , the shape and size of the contact elements, their stiffness and elasticity is among the main parameters determining friction.

More rigid elements of surfaces intrusion into softer counterbody due to waviness, roughness, heterogeneity of mechanical properties and duality of molecular-mechanical nature of friction.

Accordingly, the speed v of the indenter determines the friction force. At the same time, an increase in the load on the separately selected indenter leads to an increase in the friction force. However, the support reaction force N affects the area of the actual contact A_r in the actual operating conditions of the friction pair. The actual contact area depends on the load. Increasing the area of actual contact reduces specific pressure. Thus, the dependence of the friction force on the relative velocity of the friction pair and the load is not linear and differs for different materials.

Summary:

1. In the research of the friction of polymeric and metallic materials should be used adhesion-deformation theory of friction, which includes the definition of the molecular and mechanical components of the friction forces.

2. The thermal and mechanical properties of materials should be determined by the known friction force of the friction pair.

3. A positive gradient rule should be observed and lubrication films, oxide films or films of a soft component in the friction contact should be provided.

4. It is necessary to determine the area of the contacting surfaces at the given micronutrients and friction forces.

5. It is necessary to take into account the shape and size of the friction unit and the coefficient of mutual overlap.

Keywords: friction, coefficient of friction, friction force.

References

1. Kragel'skii I.V. *Trenie i iznos* (Friction and wear), Moscow, Mashinostroenie, 1968, 480 p.
2. Chichinadze A.V. *Braun E.D., Bushe N.A. Osnovy tribologii: trenie, iznos, smazka* (The basics of tribology: friction, wear, lubrication), Moscow, Mashinostroenie, 2001, 664 p.
3. Khebda M., Chichinadze A.V. *Spravochnik po tribotekhnike* (Reference of tribology), Moscow, Mashinostroenie, 1989. Vol. 1 "Teoreticheskie osnovy", 400 p.
4. Kuznetsov V.D., Loskutov A.I., Kogan Yu.I. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 1957, no. 1, pp. 32-35.

5. *Trenie, iznashivanie i smazka. Terminy i opredeleniya. GOST 27674-88* (Friction, wear and lubrication. Terms and definitions. State Standard 27674-88), Moscow, Standarty, 1988, 16 p.
6. Bilyaletdinova L.R., Steblinkin A. I. Mathematical modeling of electromechanical steering gear with ball-screw actuator with account for nonlinearities of “dry friction” and “backlash” types. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 3, pp. 95-108.
7. Firsanov V. V. Method of calculation of the stress-strain state of elastic rod systems with unilateral communications and a friction in sliding pairs. *Aerospace MAI Journal*, 2010, vol. 17, no. 4, pp. 30-39.
8. Akhmetova E.R., Tazetdinov R.G. A modification of titanium alloys for friction pairs by periodic discharge in liquid flow. *Aerospace MAI Journal*, 2009, vol. 16, no. 1, pp. 73-83.
9. Frolov K.V. *Sovremennaya tribologiya: itogi i perspektivy* (Modern tribology: results and prospects), Moscow, LKI, 2008, 480 p.
10. Popov V.L. *Contact Mechanics and Friction. Physical Principles and Applications*. Berlin, Springer-Verlag, 2010, 362 p.
11. Popov V.L., Dimaki A.V. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2012, vol. 15, no. 3, pp. 55–57.
12. Polyakov S.A. *Samoorganizatsiya pri trenii i effekt bezyznosnosti. Dissipativnaya morfologiya i nanostrukturnyi sintez* (Self-organization in friction and the effect of wearlessness), Moscow, RGAU-MSKhA im. K A. Timiryazeva, 2009, 107 p.
13. Polyakov S.A., Goncharov S.Yu., Zakharov M.N., Lychagin V.V. *Vestnik mashinostroeniya*, 2015, no. 1, pp. 54-57.
14. Petrova P.N., Argunova A.G., Isakova T.A. *Vestnik mashinostroeniya*, 2015, no. 8, pp. 67-70.
15. Okhlopko A.A., Petrova P.N., Gogoleva O.V. Investigation of the triboengineering characteristics of nanocomposites based on polymeric blends. *Journal of Friction and Wear*, 2009, vol. 30, no. 5, pp. 363-368. DOI: 10.3103/S1068366609050109
16. Drozdov Yu.N., Yudin E.G., Belov A.I. *Prikladnaya tribologiya: trenie, iznos, smazka* (Applied tribology: friction, wear, lubrication), Moscow, Eko-Press, 2010, 603 p.
17. Polyakov S.A., Kuksenova L.I., Lychagin V.V., Goncharov S.Yu. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmkh*, 2013, no. 8, pp. 29-36.
18. Krishtal M.A., Piguzov Yu.V., Golovin S.A. *Vnutrennee trenie v metallakh i splavakh* (Internal friction in metals and alloys), Moscow, Metallurgiya, 1964, pp. 44 (120 p.)
19. Malenko P.I. *Vestnik mashinostroeniya*, 2011, no. 7, pp. 38-42.
20. Drozdov Yu.N., Malenko P.I. *Trenie i iznos*, 2014, vol. 35, no. 1, pp. 87-98.