ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ТРЕНИЕ и СМАЗКА В МАШИНАХ И МЕХАНИЗМАХ

Издается с июля 2005 г.

6 июнь 2010

Выходит по инициативе и при содействии Российского национального комитета по трибологии, при поддержке Ассоциации инженеров-трибологов России (АИТ), Международного Союза научных и инженерных объединений (МСНИО), Российской (РИА) и Международной инженерных академий (МИА)

Журнал входит в перечень изданий, утвержденных ВАК РФ для публикаций трудов соискателей ученых степеней

Председатель редакционного совета
академик РАН и РИА
В.И. КОЛЕСНИКОВ

Заместитель председателя:
академик МИА
Ю.М. ЛУЖНОВ

Главный редактор
И.Н. ЖЕСТКОВА

Редакционный совет:

МОСКВА
И.А. БУЯНОВСКИЙ
Д.Н. ГАРКУНОВ
В.В. ГРИБ
С.М. ЗАХАРОВ
В.Я. КЕРШЕНБАУМ
А.Т. РОМАНОВА
И.Г. ФУКС

БРЯНСК
О.А. ГОРЛЕНКО
Е.А. ПАМФИЛОВ

КАЛИНИНГРАД
С.В. ФЕДОРОВ

КЕМЕРОВО
А.Н. КОРОТКОВ

НАЛЬЧИК
М.А. МАМХЕГОВ

РОСТОВ-НА-ДОНУ
И.М. ЕЛМАНОВ
А.С. КУЖАРОВ
А.А. РЫЖКИН

РЫБИНСК
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ

САМАРА
Д.Г. ГРОМАКОВСКИЙ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
Л.И. ПОГОДАЕВ

СТАВРОПОЛЬ
Н.С. ПЕНКИН

ТВЕРЬ
Н.Б. ДЕМКИН

ТОМСК
В.Е. ПАНИН
А.В. КОЛУБАЕВ

УФА
В.Ю. ШОЛОМ
(зам. главного редактора)

ХАБАРОВСК
А.Ю. КОНЬКОВ

БЕЛАРУСЬ
Н.К. МЫШКИН

МОЛДОВА
В. ГОЛОГАН

УКРАИНА
С.А. КЛИМЕНКО
В.В. ШЕВЕЛЯ

ГЕРМАНИЯ
Г. ФЛЯЙШЕР
А. ЖЕРВЕ
Г. ТЕППЕР

ПОЛЬША
Я. СЕНАТОРСКИЙ
М. ЩЕРЕК

Редакция:
Н.М. КУЩ-ЖАРКО,
И.М. ГЛИКМАН

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-21137 от 19 мая 2005 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ

Воронин Н.А., Козиков А.С. Влияние трения на несущую способность однослойных топокомпозитов 3

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ И ДИАГНОСТИКА

Смушкович Б.Л. Расширение возможностей испытаний на автотрибометре 13

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ

Суслов А.Г., Цуканов И.Ю. Конструкторско-технологическое обеспечение износостойкости винтовой пары трения скольжения 16

Копченков В.Г. Виды и механизмы изнашивания резин в условиях контактно-динамического нагружения 24

СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПРИСАДКИ

Крахмалёв С.И., Таранова Н.В. Состав пластичных смазок и формирование смазочного слоя в трибосопряжении вал–втулка 29

ИСТОРИЯ ТРИБОЛОГИИ

Хрущов М.М. Повышение износостойкости сталей путем поверхностных упрочнений за счет термических, химико-термических обработок, нанесения покрытий и наплавок 38

СПРАВОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ

Триботехнические свойства некоторых минералов в вакууме 47

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогу "Роспечать" – **20139**, Объединенному каталогу "Пресса России" – **39039**, каталогу "Почта России" – **60253**) или непосредственно в издательстве.

Тел. (499) 268-38-42; тел./факс: (499) 268-85-26; факс: (499) 269-48-97. E-mail: tsmm@mashin.ru; sborka@mashin.ru

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале, допускаются только с разрешения редакции и со ссылкой на источник информации.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

© **Издательство "Машиностроение", "Трение и смазка в машинах и механизмах", 2010**

THE MONTHLY SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL JOURNAL

FRICTION & LUBRICATION IN MACHINES AND MECHANISMS

Publishes from July, 2005

6 June 2010

The journal is published on the initiative and with help of Russian National Committee on Tribology, with support of The Tribology Engineers Association of Russia (TEA), The International Union of Scientific and Engineering Societies (IUSES), Russian (REA) and International Engineering Academies (IEA)

The Journal is among those approved by AAC RF for dissertation publication

President of Editorial advistory board
Academician of RAS and REA
V.I. KOLESNIKOV

Vice-Presidents:
Academician of IEA
YU.M. LUZHNOV

Editor in Chief:
I.N. ZHESTKOVA

Editorial advisory board:

MOSCOW
I.A. BUYANOVSKY
D.N. GARKUNOV
V.V. GRIB
S.M. ZAKHAROV
V.YA. KERSHENBAUM
A.T. ROMANOVA
I.G. FOOKS

BRYANSK
O.A. GORLENKO
E.A. PAMFILOV

KALININGRAD
S.V. FEDOROV

KEMEROVO
A.N. KOROTKOV

NALCHIK
M.A. MAMHEGOV

ROSTOV-ON-DON
I.M. ELMANOV
A.S. KUZHAROV
A.A. RYZHKIN

RYBINSK
V.F. BEZ"YAZYCHNY

SAMARA
D.G. GROMAKOVSKY

ST.-PETERSBURG
L.I. POGODAEV

STAVROPOL'
N.S. PENKIN

TVER
N.B. DEMKIN

TOMSK
V.E. PANIN
A.V. KOLUBAEV

UFA
V.YU. SCHOLOM
(Deputy chief editor)

KHABAROVSK
A.YU. KONKOV

BELARUS'
N.K. MYSHKIN

MOLDOVA
V. GOLOGAN

UKRAIN
S.A. KLIMENKO
V.V. SHEVELYA

GERMANY
G. FLEISCHER
A. GERVEY
G. TEPPER

POLAND
JA. SENATORSKY
M. SCHEREC
S. PYTKO

Editors:
N.M. KUSCH-ZHARKO
I.M. GLIKMAN

The journal is registered by RF Ministry of Press, Tele-and Broadcasting and Mass Communications Media.
Registration certificate ПИ 1 ФС 77-21137, May 19, 2005 Free price.

CONTENTS

Fundamental problems of abrasion and outwearing

Voronin N.A., Kozikov A.S. Influence of friction on bearing capacity of onelayered topocomposites 3

Tribological testing and tribodiagnostics

Smushkovich B.L. Enhancement of the auto tribometer testing 13

Tribological materials technology and technology

Suslov AG., Tsukanov I.Yu. The design and engineering wear resistance support of sliding screw pair 16

Kopchenkov V.G. Forms and mechanisms of wear of the rubbers under contact-dynamical loading conditions 24

Lubricants and addition agents

Krakhmalev S.I., Taranova H.V. Composition of greasy lubrications and forming of lubricating layer in shaft – barrel bearing 29

History of tribology

Khruschov M.M. Improving of wear resistance of steels as a result of thermal and chemicothermal treatment, plating and welding deposition 38

Refepences

Tribotechnical properties of some mineral in vacuum 47

The journal is being distributed according to a subscription, which is available in any post office (indexes in the catalogue "Rosspechat" – **20139**, Joint Catalogue "Pressa Rossii" – **39039**, by the catalogue "Pochta Rossii" – **60253**) or at the publishing house directly.

Tel.: (499) 268-38-42; tel./fax: (499) 268-85-26. Fax: (499) 269-48-97. E-mail: tsmm@mashin.ru; sborka@mashin.ru

Reprint, all types of copying and reproduction of the materials published in the journal "Assembling in Mechanical Engineering and Instrument Making" are allowed only with the permission from the editors and with the reference to the source of information.

Advertisers are fully responsible for the content of the advertisements.

© **"Mashinostroenie" Publishing House, "Friction & Lubrication in Machines and Mechanisms", 2010**

УДК 620.17

Н.А. Воронин, *д-р техн. наук,* **А.С. Козиков** *(Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН)*

Влияние трения на несущую способность однослойных топокомпозитов

Рассмотрена механика контактного взаимодействия сферического индентора с двухслойным упругопластичным полупространством, имитирующим твердое тело с поверхностным слоем. Исследован случай силового взаимодействия жесткого сферического штампа при наличии трения в контакте. Нормальные и касательные напряжения в контакте связаны между собой законом Амонтона–Кулона. Анализируются зависимости несущей способности от коэффициента внешнего трения и толщины поверхностного слоя (покрытия) для всего диапазона возможных толщин. Особое внимание уделено анализу поведения слоистых систем, относящихся к топокомпозитам. Расчеты показывают, что увеличение коэффициента трения приводит к снижению максимального значения несущей способности поверхности однослойных топокомпозитов. Для топокомпозитов снижение максимальной величины несущей способности сопровождается уменьшением критической толщины покрытия, при которой обеспечиваются его эффективные защитные функции. Для твердых топокомпозитов в области малых толщин покрытия при коэффициентах трения 0,35 и выше исчезает область аномальной пластичности.

In work the mechanic of contact interaction spherical indenter with the two-layer elastic-plastic half-space simulating a solid with a surface layer is considered. The case of load indentation of a rigid spherical stamp with a friction in contact is investigated. Normal and tangential stresses in contact are connected among themselves by the Amonton–Culon law. Dependences of bearing capacity on coefficient of friction and a thickness of a coating for all range of possible thickness are analyzed. The special attention is given the analysis of behavior of the layered systems concerning to topocomposites. Calculations show that the increasing coefficient of friction leads to decrease of the maximum value of bearing capacity of a surface of a single-layered topocomposites. For topocomposites the decreasing of the maximum value of bearing capacity is accompanied by reduction of a critical thickness of a coating at which effective protective functions of a coating are provided. For hard topocomposites in the range of small thickness of a coating at coefficient of friction 0,35 and above the area of abnormal plasticity disappears.

Ключевые слова: топокомпозиционные материалы, слоистые системы, несущая способность, коэффициент трения.

Key words: topocomposites, layered systems, bearing capacity, coefficient of friction.

Топокомпозиты как класс конструкционных материалов, обеспечивающих специфические, отличные от компактных материалов той же природы, механические характеристики, в том числе трибологические, эффективно применяются в узлах трения [1]. Опытным путем и практикой показана эффективность использования топокомпозитов как с высокой поверхностной твердостью в качестве износостойких, так и с низкой твердостью поверхностных слоев в качестве антифрикционных (смазочных) [2]. Несмотря на это, роль и влияние таких важных параметров, как толщина слоя, контактные усилия, соотношение физико-механических свойств поверхностного слоя и подложки, сил трения и остаточных напряжений на работоспособность и трибологическую прочность, изучены недостаточно. Это приводит к тому, что выбор толщины покрытия зачастую конструкторы осуществляют эмпирически, путем проб и ошибок, на основе интуиции и по аналогии с уже реализованными техническими решениями, без ясного и достаточного понимания особенностей поведения поверхности трения при реализации в приповерхностном объеме материала топокомпозитного строения.

Анализ известных в литературе решений контактных задач для слоистых систем показывает, что точные решения получают с применением численных методов, требующих

применения ЭВМ, программного обеспечения и, в ряде случаев, значительных затрат машинного времени. Полученные рядом авторов аналитические выражения имеют довольно громоздкий вид и не вполне пригодны для инженерных расчетов. Лишь небольшая часть опубликованных работ теоретического плана рассматривает влияние сил трения на напряженно-деформированное состояние приповерхностных объемов материала, включающих один или несколько слоев отличной от подложки природы [3–5]. Однако эти исследования не охватывают весь диапазон возможных толщин поверхностных слоев и не анализируют предельное состояние слоистых сред в области существования этих сред в топокомпозитном варианте, т.е. в областях реализации аномальной прочности [6].

В данной работе рассмотрена механика контактного взаимодействия сферического индентора с двухслойным упругопластичным полупространством, имитирующим твердое тело с поверхностным слоем другой, чем материал основы, природы. Исследован случай силового взаимодействия жесткой сферы при наличии трения в контакте. Нормальные и касательные напряжения в контакте связаны между собой законом Амонтона–Кулона. Анализируются зависимости несущей способности от физико-механических характеристик материалов основы и покрытия, коэффициента внешнего трения, а также толщины поверхностного слоя (покрытия) для всего диапазона возможных толщин. Особое внимание уделяется анализу поведения слоистых систем, относящихся к топокомпозитам.

Постановка задачи. В работе [7] рассмотрена контактная задача о внедрении жесткой сферы радиуса R в двухслойное упругое жесткопластическое полупространство, состоящее из поверхностного слоя толщиной h и основы толщиной $H >> h$. Материалы слоистой системы считались однородными, гомогенными и не имеющими остаточных напряжений. Поверхностный слой считался жестко связанным с основой. Для расчета сближения при статическом нормальном нагружении жесткой сферой двухслойного полупространства использовался методический прием "сшивки" известных аналитических зависимостей, описывающих внедрение сферы в две различные компактные однородные среды: одна – из материала покрытия, другая – из материала основы топокомпозита.

В результате были получены аналитические зависимости для определения величины несущей способности слоистой системы для диапазона толщин покрытия $0 \le h \le \infty$:

$$P_{\text{с}} = P_0^{\text{кр}} (\overline{\Phi}^{\,i})^{\frac{3}{2}} (\Phi)^{-\frac{3}{2}}, \qquad (1)$$

где обозначения, входящие в аналитическое выражение (1), а также в последующие по тексту, приведены в конце данной работы.

Под предельным состоянием в данной работе, как и в работе [7], понимается критическая величина нормальной нагрузки, при которой в слоистой системе в приповерхностном объеме возникает (зарождается) пластическая деформация.

Целью данной работы являлось установление аналитических (теоретических) зависимостей изменения величин несущей способности поверхности двухслойной упругой жесткопластической среды от толщины покрытия для ряда значений коэффициента трения.

Методика решения задачи. Для учета сил трения между сферическим индентором и поверхностью компактного однородного тела воспользуемся законом Амонтона–Кулона, связывающего касательные усилия, действующие параллельно оси x в области контакта, с нормальным давлением в контакте, определяемым теорией Герца:

$$q(r) = \frac{3fP}{2\pi a^3}(a^2 - r^2)^{1/2} = fp_0(a^2 - r^2)^{1/2}.$$

При такой постановке обычно пренебрегают взаимовлиянием нормальных давлений и касательных усилий, обусловленных различием упругих постоянных двух тел: сферического штампа и твердого тела. Это же допущение действительно и для данной работы при рассмотрении случая контактного взаимодействия сферического штампа со слоистым полупространством.

Компоненты напряжений в однородном полупространстве, вызванные нормальными и касательными усилиями, могут быть найдены с помощью решения соответствующих соотношений, записываемых для сосредоточенных нормальной и тангенциальной сил посредством интегрирования по области контакта. Точные соотношения для расчета компонентов напряжений в произвольной точке полупространства приведены в работе Сэквилда и Хиллса [8]:

$$\frac{\sigma_x}{p_0}=(1-2\mu)\frac{1}{3r^2}(x^2-y^2)\left(1-\frac{z^3}{u^3}\right)+$$
$$+\frac{z}{u}\left[(1-2\mu)u\,\mathrm{arctg}\left(\frac{1}{u}\right)-2\mu-(1-\mu)\frac{u^2}{1-u^2}\right]-$$
$$-\frac{z}{u}\left[(1-2\mu)\frac{x^2}{r^2(1+u^2)}+\frac{x^2u^4}{(1+u^2)(u^4+z^2)}\right];$$
$$\frac{\sigma_y}{p_0}=(1-2\mu)\frac{1}{3r^2}(x^2-y^2)\left(\frac{z^3}{u^3}-1\right)+$$
$$+\frac{z}{u}\left[(1-2\mu)u\,\mathrm{arctg}\left(\frac{1}{u}\right)-2\mu-(1-\mu)\frac{u^2}{1-u^2}\right]-$$
$$-\frac{z}{u}\left[(1-2\mu)\frac{y^2}{r^2(1+u^2)}+\frac{y^2u^4}{(1+u^2)(u^4+z^2)}\right];$$

$$\frac{\sigma_z}{p_0}=-\frac{z^3}{u(u^4+z^2)};$$

$$\frac{\tau_{xz}}{p_0}=-\frac{xz^2u}{(1+u^2)(u^4+z^2)}; \qquad (2)$$

$$\frac{\sigma_x}{q_0}=-\left(\frac{\sigma_y}{q_0}+\frac{\sigma_z}{q_0}\right)-x(1+\mu)\left[\mathrm{arctg}\left(\frac{1}{u}\right)-\frac{u}{(1+u^2)}\right];$$

$$\frac{\sigma_y}{q_0}=2\mu x\left[-\frac{3}{8}\mathrm{arctg}\left(\frac{1}{u}\right)+\frac{u}{4(1+u^2)^2}+\frac{3u}{8(1+u^2)}-\right.$$
$$\left.-\frac{y^2u^5}{(1+u^2)^3(u^4+z^2)}\right]+(1-2\mu)z\frac{\partial J}{\partial y};$$

$$\frac{\sigma_z}{q_0}=-\frac{xz^2u}{(1+u^2)(u^4+z^2)}; \qquad (2)$$

$$\frac{\tau_{xz}}{q_0}=z\left[\frac{3}{2}\mathrm{arctg}\left(\frac{1}{u}\right)-\frac{1}{u}+\frac{u}{2(1+u^2)}-\right.$$
$$\left.-\frac{x^2u^3}{(1+u^2)^2(u^4+z^2)}\right];$$

где $r^2=x^2+y^2$, $\frac{\partial J}{y}=J\frac{(x^2-3y^2)}{yr^2}+$
$$+\frac{uxy^2z}{r^2(u^4+z^2)(1+u^2)},$$
$$J=\frac{xy}{3r^4}\left\{\left(\frac{z}{u}\right)^3-3\left(\frac{z}{u}\right)+2\right\}$$

и u^2 есть положительный корень уравнения:

$$\frac{r^2}{1+u^2}+\frac{z^2}{u^2}=1.$$

Известно условие перехода однородного упругого жесткопластического твердого тела из состояния упругости в пластичное при нормальном нагружении его поверхности жесткой сферой радиуса R. В качестве критерия начала зарождения пластической деформации может служить величина критического сближения $\delta^{кр}$. Согласно теории Герца первоначальная пластическая деформация в однородном упругопластичном материале возникает на глубине $z\approx 0{,}49a$ непосредственно под центром контактной области. Именно на этой глубине максимальное значение максимальных касательных напряжений τ_1^{max} достигает предела текучести при сдвиге k, который в свою очередь в соответствии с условием пластичности Треска составляет величину,

равную половине предела текучести на растяжение $\frac{1}{2}\sigma_т$ [9].

С появлением и увеличением сил трения между сферой и плоской поверхностью точка зарождения пластической деформации остается в плоскости деформации, но смещается к поверхности полупространства. Течение инициируется на поверхности, если f превышает ~ 0,3 [9].

Максимальное касательное напряжение в плоскости деформации равно:

$$\tau_1 = 1/2[(\sigma_x - \sigma_z) + 4\tau_{xz}^2]^{1/2}. \qquad (3)$$

Рассчитываем значения компонентов напряжений и максимальные касательные напряжения по формулам (2) и (3) для следующего ряда значений коэффициента трения: 0; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,325, 0,35; 0,4; 0,5 и 0,6.

Найдем аналитическую зависимость, связывающую значения предельного давления в центре контакта при трении с величиной предельного давления при статическом нормальном нагружении.

Вначале рассчитаем для выбранного ряда значений коэффициента трения величины предельного давления, пронормированного относительно предела текучести при сдвиге k. Рассчитанные значения пронормированного предельного давления представлены в табл. 1.

Графическое представление рассчитанных значений f и (p_0/k) показано на рис. 1.

Значения максимального контактного давления, вызывающего течение для плоского и пространственного контактов, приведены в [10]. Можно отметить хорошее совпадение рассчитанных в данной работе значений с результатами расчетов, приведенных в работе [10].

Получим аналитические выражения для описания кривых изменения предельного давления, пронормированного относительно предельного давления при статическом нормальном нагружении, от величины коэффициента трения. Для этого построим линии тренда для участков подповерхностного и поверхностного зарождения пластической деформации (рис. 2), используя возможности программы Excel. Уравнение тренда для участка подповерхностного течения было получено в виде $y = 1 - x^2$, а участка поверхностного течения – $y = 0{,}3x^{(-1)}$ или в принятых в данной работе обозначениях:

1. Ðàñ÷åòí û å çí à÷åí èÿ ï ðåäåëüí î ãî êî í òàêòí î ãî äàâëåí èÿ ï ðè ðàçëè÷í ûõ çí à÷åí èÿõ êî ýô ô èöèåí òà òðåí èÿ *f*

f	$\left(\frac{p_0}{k}\right)$ подповерхностное	$\left(\frac{p_0}{k}\right)$ поверхностное
0	3,2276	–
0,1	3,2033	–
0,15	3,1725	–
0,2	3,1339	–
0,25	3,0740	–
0,3	3,0002	–
0,325	2,9627	–
0,35	–	2,7376
0,4	–	2,4206
0,5	–	1,9609
0,6	–	1,6454

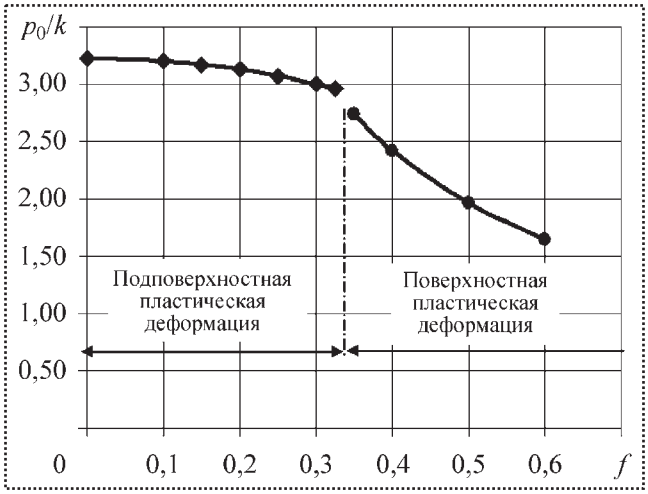


Рис. 1. Пронормированные по k значения максимального контактного давления p_0 от коэффициента трения f

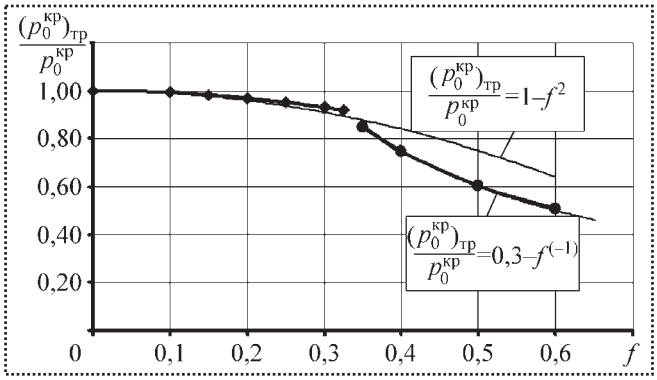


Рис. 2. Зависимость критического нормального давления от коэффициента *f* трения при скольжении жесткой сферы по твердому полупространству

$$\frac{(p_0^{кр})_{тр}}{p_0^{кр}} = 1 - f^2; \qquad (4)$$

$$\frac{(p_0^{кр})_{тр}}{p_0^{кр}} = 0{,}3 f^{(-1)}. \qquad (5)$$

Погрешность аппроксимирующих функций не превышает 3 % (табл. 2), что может считаться допустимой величиной при инженерных расчетах.

2. Ï î ãðåøí î ñòü àï ï ðî êñèì èðóþ ù èõ ô óí êöèé (4) è (5)

f	$\frac{(p_0^{кр})_{тр}}{p_0^{кр}}$ подповерхностное	$\frac{(p_0^{кр})_{тр}}{p_0^{кр}}$ поверхностное	$\frac{(p_0^{кр})_{тр}}{p_0^{кр}} = 1 - f^2$	$\frac{(p_0^{кр})_{тр}}{p_0^{кр}} = 0{,}3 f^{(-1)}$	Погрешность, %
0	1,000	–	1,000	–	0,00
0,1	0,992	–	0,990	–	0,25
0,15	0,983	–	0,978	–	0,55
0,2	0,971	–	0,960	–	1,14
0,25	0,952	–	0,938	–	1,59
0,3	0,930	–	0,910	–	2,15
0,325	0,918	–	0,894	–	2,63
0,35	–	0,846	–	0,857	1,32
0,4	–	0,748	–	0,750	0,27
0,5	–	0,606	–	0,600	–0,98
0,6	–	0,508	–	0,500	–1,66

Из формул Герца известно, что критический радиус контакта

$$a^{кр} = K p_0^{кр} R,$$

где $K = \frac{1-\mu^2}{E}$.

Воспользовавшись полученными выше выражениями (4) и (5), можем записать:

$$\frac{(a^{кр})_{тр}}{a^{кр}} = 1 - f^2; \qquad (6)$$

$$\frac{(a^{кр})_{тр}}{a^{кр}} = 0{,}3 f^{(-1)}. \qquad (7)$$

Построим серию кривых изменения τ_1 для ряда значений коэффициента трения от величины значений z/a. Для каждого значения f были выбраны такие значения x/a, при которых имело место максимальное значение (мода) τ_1^{max} при некоторой величине z/a. Полученные в результате такого анализа кривые представлены на рис. 3.

На рис. 3, *б* выделим координаты мод, которые имеют максимальные значения τ_1 (указаны стрелками). По этим координатам построим кривую изменения координат зарождения подповерхностной пластической деформации от f в значениях, пронормированных по $z/a = 0{,}49$ (табл. 3 и рис. 4). Координаты зарождения пластической деформации в поверхностных слоях равны нулю для всех значений коэффициента трения, бóльших 0,325 (см. табл. 3 и рис. 4).

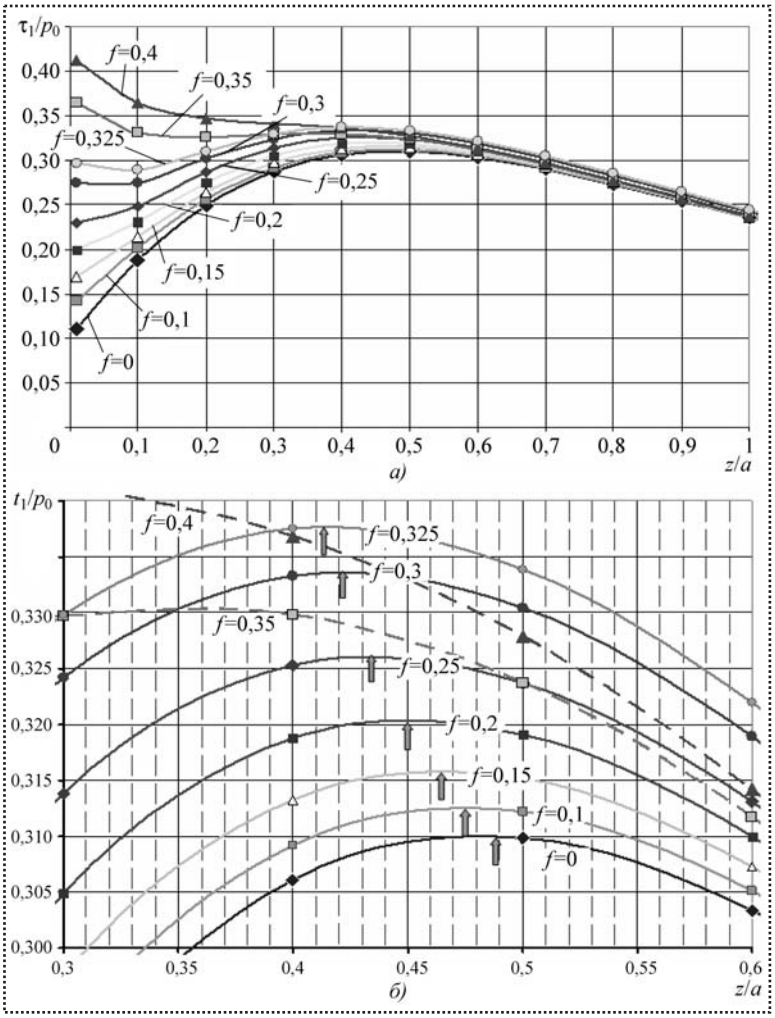


Рис. 3. Зависимости τ_1 от глубины z/a для ряда значений f и x/a: *а* – для диапазона $0 \le z/a \le 1$; *б* – для диапазона $0{,}3 \le z/a \le 0{,}6$

Для участка подповерхностного зарождения пластической деформации получена аналитическая аппроксимирующая функция изменения координат зарождения пластического течения от коэффициента трения при использовании программы Excel. Тренд искался как можно в более простой полиномиальной форме. Результаты приведены на рис. 4 и в табл. 3. Полученная (см. рис. 4) аппроксимирующая полиномиальная зависимость z/a для участка зарождения подповерхностной пластической деформации от f в принятых в данной работе обозначениях имеет вид:

$$\left(\frac{z}{a^{\text{кр}}}\right)^{\tau_1}_{\text{тр}} = (1-1{,}5f^2)\left(\frac{z}{a^{\text{кр}}}\right)^{\tau_1}, \qquad (8)$$

где $\left(\frac{z}{a^{\text{кр}}}\right)^{\tau_1} = 0{,}49.$

Погрешность аппроксимирующей функции (8) находится в районе 3 % (см. табл. 3).

Действие сил трения на поверхности двухслойного тела приводит к изменению картины напряженного состояния в подповерхностных слоях контакта и, как следствие, к изменению момента наступления предельного состояния.

Аналитически рассчитать изменение величины несущей способности слоистого тела при трении по его поверхности жесткой сферы возможно при использовании формулы (1), которая скорректирована применением зависимостей (6)–(8).

Изменение величины несущей способности двухслойного полупространства от коэффициента трения для двух

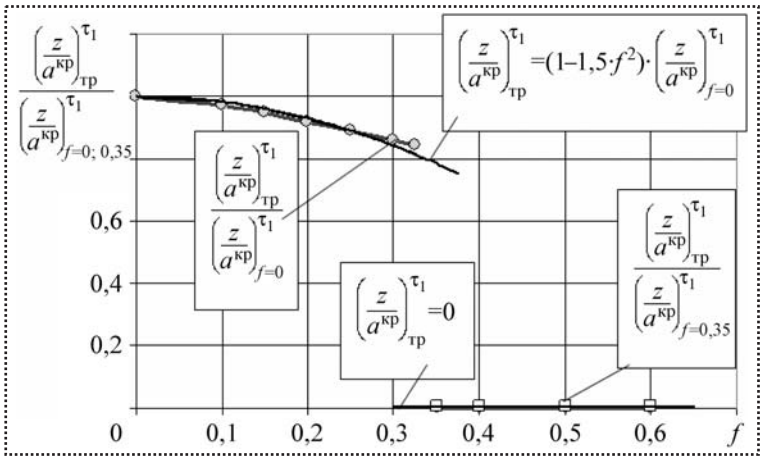


Рис. 4. Координаты точки возникновения пластического течения от коэффициента трения f, рассчитанные по формуле (2) и по аппроксимирующим функциям

3. Êî î ðäèí àòû ðî ÷åê çàðî æäåí èÿ ï ëàñòè÷åñêî é äåô î ðì àöèè ï ðè ðàçëè÷í û õ çí à÷åí èÿõ êî ýô ô è-öèåí òà òðåí èÿ, ðàññ÷èòàí í û å ï î ô î ðì óëå (2) è ï î àï ï ðî êñèì èðóþ ù èì ô óí êöèÿì

f	$\left(\frac{z}{a^{кр}}\right)^{\tau_1}_{тр}$	$\left(\frac{z}{a^{кр}}\right)^{\tau_1}_{тр} \Big/ \left(\frac{z}{a^{кр}}\right)^{\tau_1}_{f=0;0,35}$	$\left(\frac{z}{a^{кр}}\right)^{\tau_1}_{тр} = (1-1{,}5f^2)\left(\frac{z}{a^{кр}}\right)^{\tau_1}$	$\left(\frac{z}{a^{кр}}\right)^{\tau_1}_{тр} = 0$	Погрешность, %
0	0,49	1,0000	1,0000	–	0,00
0,1	0,475	0,9694	0,9825		–1,35
0,15	0,465	0,9490	0,9606		–1,23
0,2	0,45	0,9184	0,9300		–1,27
0,25	0,435	0,8878	0,8906		–0,32
0,3	0,42	0,8571	0,8425		1,71
0,325	0,412	0,8408	0,8152		3,05
0,35	0	0	–	0	0
0,4					
0,5					
0,6					

характерных слоистых тел представлено на рис. 5:

- когда покрытие более твердое, чем материал основы (для примера использованы значения $K = 0{,}5$ и $Y = 3$);
- когда материал основы более твердый, чем материал покрытия (для примера использованы значения $K = 2$ и $Y = 0{,}4$).

Для подтверждения адекватности основной зависимости (1), используемой в данной работе, на рис. 5 приведены результаты численных расчетов методом конечных элементов (МКЭ) при использовании программного пакета ANSYS для случая, когда трение между сферой и слоистым полупространством отсутствует.

Как видно из рис. 5, увеличение сил трения в контакте сферического индентора с поверхностью слоистого тела приводит к снижению несущей способности поверхности в такой же пропорциональности, что и в случае использования компактных однородных твердых тел. Однако для топокомпозитов с твердым покрытием снижение несущей способности сопровождается уменьшением критической толщины покрытия, при которой обеспечиваются эффективные защитные функции покрытия (сравнить значения $\bar{h}^*$ при $f = 0$ и $\bar{h}^*$ при $f = 0{,}3$; 0,35; 0,6 на рис. 5, *а*). В области проявления сил трения, обеспечивающих существование коэффициента трения в диапазоне от 0,3 до 0, 4, отмечается локальное возрастание несущей способности слоистого тела. Это наглядно демонстрируют результаты исследования, представленные в виде зависимости величины максимальной несущей способности (существующей в области локального повышения прочности топокомпозита [7]) от коэффициента трения (рис. 6).

Возрастание максимального значения несущей способности твердых топокомпозитов в указанной области значений коэффициента трения связано с градиентом по толщине напряжений растяжения, инициируемых различием в значениях упругих модулей материала подложки и покрытия и резким перемещением точки локального зарождения пластической деформации из подповерхностных (глубинных) областей покрытия на поверхность слоистого полупространства.

В области малых толщин покрытия, там, где для твердых топокомпозитов находится область повышенной пластичности при статическом внедрении жесткой сферы (см. значения несущей способности при толщинах $h \approx 0{,}5a_0^{кр}$ и $f = 0...0{,}3$ на рис. 5, *а*), при коэф-

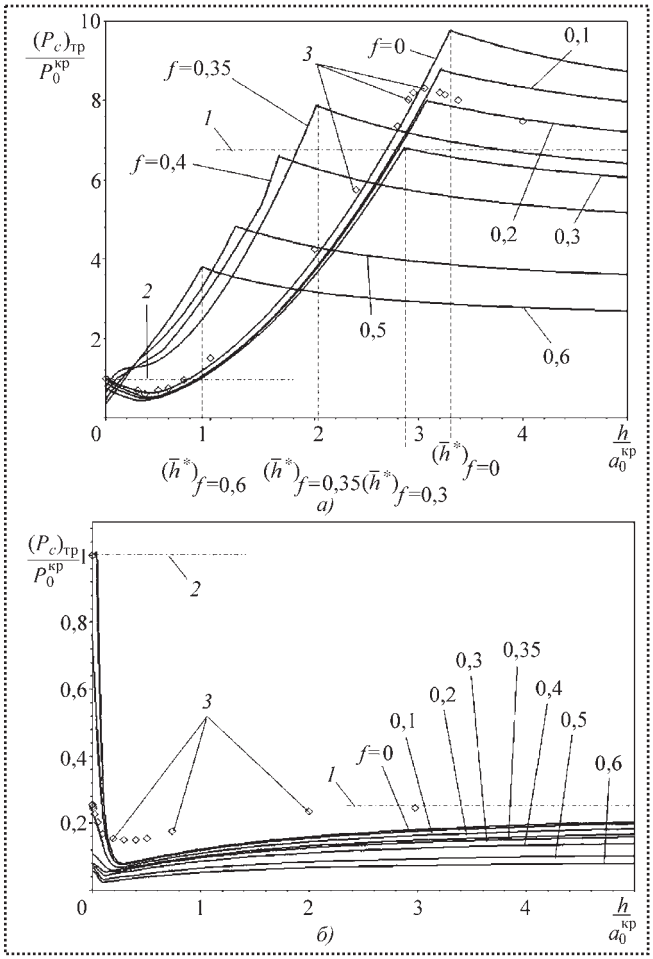


Рис. 5. Зависимости величины несущей способности слоистого тела с упругопластическими параметрами $K = 0,5$ и $Y = 3$ (*а*) и $K = 2$ и $Y = 0,4$ (*б*) от толщины покрытия для ряда значений коэффициента трения:
1 – при $h \to \infty$; *2* – при $h = 0$; *3* – расчет МКЭ для $f = 0$

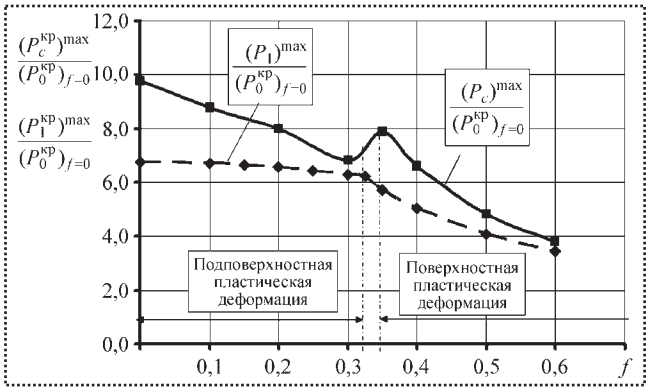


Рис. 6. Зависимости величины максимальной несущей способности слоистого тела с упругопластическими параметрами $K = 2$ и $Y = 0,4$ (верхняя кривая) и компактной однородной среды с характеристиками материала покрытия (нижняя кривая) от коэффициента трения

фициентах трения 0,35 и выше область аномальной пластичности топокомпозита исчезает. Это объясняется также переходом точки зарождения пластической деформации из глубинных областей покрытия на поверхность слоистого полупространства. С точки зрения обеспечения работоспособности твердых топокомпозитов в условиях недопущения контактной пластической деформации результаты проведенных исследований показывают, что при малых толщинах защитного слоя высокие значения коэффициента трения снижают вероятность появления пластической деформации. Для средних и больших величин толщин покрытия эффективность твердых топокомпозитов наблюдается при коэффициентах трения до 0,4, за счет обеспечения высоких значений несущей способности слоистой системы при меньших толщинах защитного слоя (сравнить значения несущей способности при $\bar{h}^* = 2$ по кривым, построенным для $f = 0,1$ и $f = 0,35$ на рис. 5, *а*).

Для топокомпозитов с мягким поверхностным слоем (см. рис. 5, *б*) снижение несущей способности происходит во всем диапазоне толщин покрытия и можно говорить о повышении антифрикционности мягких слоистых систем с увеличением однозначного взаимодействия покрытия к сфере. При этом повышение коэффициента трения приводит также к смещению критических толщин поверхностного слоя в область меньших значений при обеспечении минимальных значений несущей способности.

Выводы

В работе рассмотрена механика контактного взаимодействия сферического индентора с двухслойным упругопластичным полупространством, имитирующим твердое тело с поверхностным слоем другой, чем материал основы, природы. Исследован случай силового

взаимодействия жесткой сферы при наличии трения в контакте. Получены и проанализированы аналитические зависимости несущей способности топокомпозитов с поверхностными слоями из твердых и мягких покрытий от коэффициента трения, а также толщины поверхностного слоя (покрытия) для всего диапазона возможных толщин. Расчеты показывают, что увеличение коэффициента трения приводит в основном к снижению максимальных и текущих значений несущей способности поверхности однослойных топокомпозитов. Однако для топокомпозитов с мягким поверхностным слоем в области существования повышенной пластичности, а для твердых топокомпозитов в области существования повышенной прочности отмечается смещение моды экстремума несущей способности в область меньших толщин покрытия. В области малых толщин покрытия ($h \approx 0{,}5a_0^{\text{кр}}$) при коэффициентах трения 0,35 и выше для твердых топокомпозитов область аномальной пластичности исчезает.

Библиографический список

1. **Воронин Н.А.** Топокомпозиты – новый класс конструкционных материалов триботехнического назначения. Часть 1 // Трение и износ 1999. Т. 20. № 3. С. 313–320. Часть 2 // Трение и износ, 1999. Т. 20. № 5. С. 533–344.

2. **Holmberg K., Matthews A.** Coatings tribology – properties, techniques and applications in surface engineering. Elsevier Tribology Series, 28, 1994. 442 p.

3. **Александров В.М., Чебаков М.И.** Введение в механику контактных взаимодействий. Ростов-на-Дону: ЦВВР, 2005. 108 с.

4. **Чебаков М.И.** Взаимодействие штампа и двухслойного основания при наличии сил трения в области контакта. Экологический вестник научных центров ЧЭС, 2006. № 1. С. 60–66.

5. **Иваночкин П.Г., Колесников В.И., Флек Б.М., Чебаков М.И.** Контактная прочность двухслойного покрытия при наличии сил трения в области контакта. Механика твердого тела. 2007. № 1. С. 183–192.

6. **Воронин Н.А.** Топокомпозиты триботехнического назначения. Аномалии структурной прочности. Трение и смазка в машинах и механизмах. 2008. № 11. С. 24–32.

7. **Воронин Н.А.** Эффект толщины покрытия и материала основы на механические свойства и несущую способность упрочненных поверхностей. Методы упрочнения поверхностей деталей машин / под ред. Г.В. Москвитина. М.: КРАСАНД, 2008. С. 91–122.

8. **Sackfield A., Hills L.** A note on the Hertz contact problem: a correlation of standard formulae. Journal of strain analysis, 1983. V. 18. No. 3. P. 195–197.

9. **Колесников Ю.В., Морозов Е.М.** Механика контактного разрушения. М.: Наука, 1989. 224 с.

10. **Джонсон К.** Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989. 510 с.

Обозначения

h – толщина покрытия; E_1, μ_1, σ_{T_1} – модуль нормальной упругости, коэффициент Пуассона и предел текучести материала поверхностного слоя (покрытия) двухслойной упругой жесткопластической среды; E_0, μ_0, σ_{T_0} – модуль нормальной упругости, коэффициент Пуассона и предел текучести материала основы (подложки) двухслойной упругой жесткопластической среды; $Y = \dfrac{\sigma_{T_1}}{\sigma_{T_0}}$; $K = \dfrac{K_1}{K_0}$; $K_0 = \dfrac{1-\mu_0^2}{E_0}$; $K_1 = \dfrac{1-\mu_1^2}{E_1}$; Φ – упругогеометрический параметр, диапазон существования которого $1 \le \Phi \le K^{2/3}$ для $0 \le h \le \infty$; $\Phi = \sum_{i=0}^{m} A_i \bar{t}_0^{\,i} \left(\sum_{j=0}^{n} B_j \bar{t}_0^{\,j} \right)^{-1}$; $\bar{t}_0 = \dfrac{t_0}{a_0}$; $_{Ai} = f(K)$; $_{Bj} = f(K)$; $A_1, A_2, A_3, \ldots, A_i, B_1, B_2, B_3, \ldots, B_j$ – коэффициенты двухточечной Паде аппроксиманты; t_0 – толщина слоя со свойствами материала основы в модельном двухслойном полупространстве; a_0 – радиус пятна контакта, рассчитываемый для среды с идеальными упругими характеристиками материала основы; $\dfrac{h}{a_0} = \dfrac{t_0}{a_0}\Phi^{3/2}$ – связь между геометрией исследуемого двухслойного идеальноупругого полупространства и модельного идеальноупругого полупространства для всего диапазона толщин покрытия; $\overline{\Phi}$ – предельный упругогеометрический параметр, диапазон существования которого $1 \le \overline{\Phi} \le K^2 Y^2$ для $0 \le h \le \infty$;

$\overline{\Phi} = M^{\mathrm{I,II,III}}(\Phi)^3$; при $M^{I} = 1$: $\dfrac{h}{a_0^{\text{кр}}} = \dfrac{t_0}{a_0^{\text{кр}}}(\Phi)^{3/2}$; при

$M^{\mathrm{II}} = \left(\dfrac{\tau_1^{\max}\{f\}}{\tau_1\{f\}}\right)^2$: $\dfrac{h}{a_0^{\text{кр}}} = \dfrac{t_0}{a_0^{\text{кр}}} M^{\mathrm{II}}(\Phi)^{3/2}$;

$\tau_1^{\max}\{f=0\} = 0{,}31$ при $M^{\mathrm{III}} = Y^2$: $\dfrac{h}{a_0^{\text{кр}}} = \dfrac{t_0}{a_0^{\text{кр}}} \dfrac{(\Phi)^{3/2}}{K^{2/3}}$;

$$\tau_1\{f=0\} = \frac{1}{2}\left[\frac{3}{2}(1+\bar{t}_0^2)^{-1} - (1+\mu_0)\left(1-\bar{t}_0 \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{\bar{t}_0}\right)\right)\right];$$

$\bar{t}_0^{\text{кр}} = \dfrac{t_0}{a_0^{\text{кр}}}$; $\bar{h} = \dfrac{h}{a_0^{\text{кр}}}$; $a_0^{\text{кр}}$ – величина предельного радиуса контакта, рассчитываемая для однородной среды с характеристиками материала основы (под предельным радиусом контакта понимается радиус отпечатка, при котором в твердой однородной упругой жесткопластической среде с параметрами E_0, μ_0 и σ_{T_0} при внедрении в его поверхность жесткого сферического индентора возникает пластическая деформация); $a_c^{\text{кр}} = a_0^{\text{кр}}\sqrt{\overline{\Phi}}$ – величина предельного радиуса контакта, рассчитываемая для случая контактирования жесткой сферы с двухслойным упругим жесткопластическим полупространством; $\dfrac{h}{a_c^{\text{кр}}} = \dfrac{h}{a_0^{\text{кр}}\sqrt{\overline{\Phi}}}$; $\bar{h}^*$ – предельная минимальная толщина покрытия, при которой точка зарождения пластической деформации выходит на поверхность раздела покрытие–основа; $P_0^{\text{кр}}$ – критическая величина нормальной нагрузки, при которой в материале основы в приповерхностном объеме зарождается пластическая деформация; P_c – критическая величина нормальной нагрузки, при которой в слоистой системе в приповерхностном объеме зарождается пластическая деформация.

Контактные координаты автора

Воронин Николай Алексеевич – E-mail: voroninn@imash.ru

СПРАВОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ

Масла для смешанного автопарка

Обычно автотранспортные предприятия имеют тяжелые автомобили с дизельными двигателями разного назначения, а также микроавтобусы, малые грузовики и легковые автомобили с бензиновыми двигателями. Двигатели бывают разных мощностей, поколения и конструкции. Для таких автохозяйств удобно иметь универсальные масла, которые можно было бы применять для всех автомобилей. Такие масла выпускаются почти всеми нефтекомпаниями под названием "масла для смешанного автопарка" (mixed fleet oils). Некоторые из этих масел пригодны и для трансмиссии. Таким образом, имеется возможность сократить количество марок масел.

Многие масла для смешанного автопарка обладают высоким качеством с хорошо сбалансированным составом присадок, которые снижают полирование цилиндров дизельных двигателей, предотвращают образование осадков (шлама) и отличаются другими свойствами, присущими высококачественным маслам.

Типичные классы масел смешанного автопарка: API CF-4/SG, API CF-4/SH, API CD/SF, API CE/SG и др. Масла смешанного автопарка часто бывают всесезонными (SAE 15W-40, SAE 20W-50), но используются и сезонные с вязкостью от SAE 10W до SAE50.

Дополнительные требования изготовителей машин к маслам смешанного автопарка изложены в спецификациях.

Ñïåöèôèêàöèè ì àñåë ñìåøàííîãî àâòîïàðêà

Производитель	Спецификации
MIL	L-2104 E, F
MIL	L-46152 E
Ford	ESE-M2C 153-E
GM	6094 M
Rover	RES.22.OL.G4, RES.22.OL.PD2
VW	Norm 501.01, 505.00
MAN	271
MB	Blatt 228.1
Renault	TVI
Scania	Extended Drain
Volvo	Drain Specification (VDS)
Allison	C-4
Caterpillar	TO-2
ZF	TE-ML 03, TE-ML 07
MTU	Type 1
Mack Truck	EO-K/2

УДК 620.178.162

Б.Л. Смушкович, *канд. техн. наук (ОАО "ТОЧПРИБОР", г. Иваново)*

Расширение возможностей испытаний на автотрибометре

Описываются дополнительные возможности прибора по проведению испытаний антифрикционных и смазочных материалов, а также при различных нагрузках.

This paper is concerned with optional features of the tribo-test device for testing antifrictional materials and lubricants and under different loads as well.

Ключевые слова: испытание, автотрибометр, коэффициент трения, сухое трение, смазочные материалы, антифрикционные покрытия.

Key words: test, auto tribometer, friction coefficient, dry friction, lubricants, antifriction coatings.

В [1] описан способ определения коэффициентов трения с помощью автотрибометра АТ-250-1, работающего в режиме возбуждения автоколебаний.

Рабочий узел прибора состоит из горизонтального стержня *1* (рис. 1), который опирается на два диска *2* и *3* одинакового диаметра, причем расстояние между их центрами равно $2a$. Контактные поверхности стержня и дисков изготовлены из исследуемых материалов. Диски *2* и *3* выполнены с желобами для предотвращения боковых смещений стержня *1*.

Электропривод обеспечивает встречное синхронное вращение дисков с одинаковой скоростью. Для этого в простейшем варианте могут быть использованы синхронные мотор-редукторы *4* и *5*, на выходных валах которых закреплены диски *2* и *3*. Возможно также применение других типов приводов, в том числе с регулируемой частотой вращения. Двигатели *4* и *5* с помощью кронштейнов *6* установлены на жестком основании *7*, снабженном регулируемыми опорами *8* для обеспечения горизонтального положения стержня *1*.

Со стержнем *1* связан указатель *13*, а к основанию крепится шкала *14*, симметричная относительно центра *O*, который соответствует начальному положению стержня. В качестве указателя может также использоваться торец стержня, а механическая измерительная система может быть заменена электрической, например, с использованием бесконтактных датчиков перемещения. Ранее полученные расчетные формулы [1], необходимые для работы на приборе, могут быть уточнены с учетом реальных геометрических размеров стержня *1*.

Поскольку центр тяжести $O_ц$ стержня находится на некотором расстоянии h от точки контакта на диаметре $d_т$ диска, то при движении стержня (масса m) возникает инерционный опрокидывающий момент $M_и = m\ddot{x}h$, который вызывает перераспределение вертикальных реакций на дисках и, как результат, снижение силы трения, действующей на стержень, на величину $F_и = fm\ddot{x}h/a$.

Соответственно, дифференциальное уравнение движения стержня принимает вид:

$$\ddot{x}\left(1-\frac{fh}{a}\right)+\frac{fg}{a}x=0. \qquad (1)$$

Таким образом, стержень совершает гармонические колебания с периодом

$$T=2\pi\sqrt{\frac{(a-fh)}{fg}}. \qquad (2)$$

Отсюда, измерив T, можно найти коэффициент трения

$$f=\frac{4\pi^2 a}{gT^2+4\pi^2 h}. \qquad (3)$$

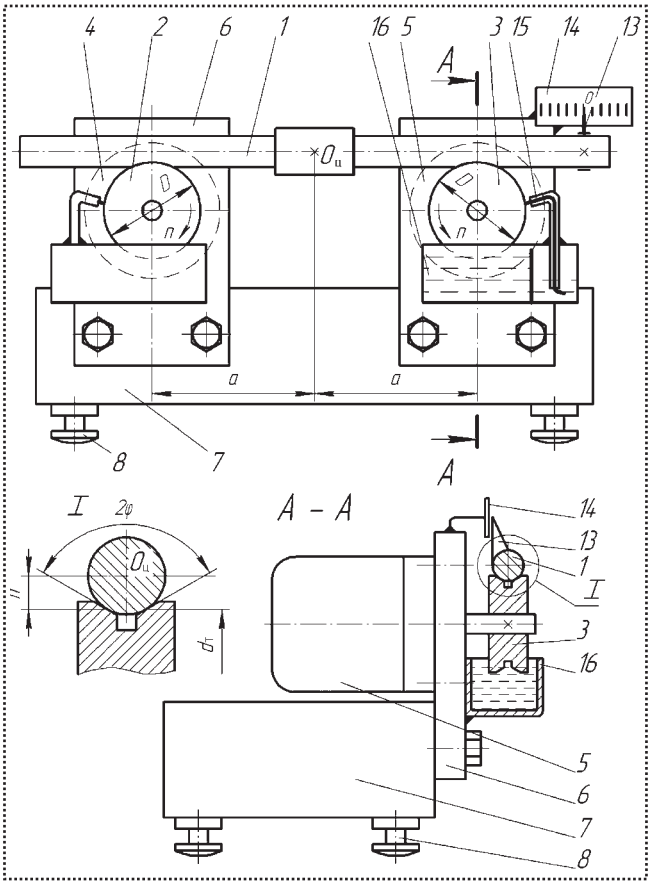


Рис. 1. Общий вид прибора

Для стержня круглого сечения с диаметром d, опирающегося на диски с углом желоба 2φ, имеем

$$h = \frac{d}{2\sin\varphi}. \qquad (4)$$

Как видно из приведенных формул, масса стержня в них не входит. Это позволяет расширить технические возможности прибора путем использования стержней разной массы, т.е. проводить испытания при различных удельных давлениях в зоне фрикционного контакта. С этой целью стержень может быть выполнен составным (рис. 2). Он состоит из штанги *9* или двух цапф *10* и *11* круглого сечения, соединенных со сменным грузом *12*. Конструктивно все составные части стержня выполнены однородными и симметричными, чтобы при смене груза *12* центр тяжести $O_ц$ стержня не менял своего положения и таким

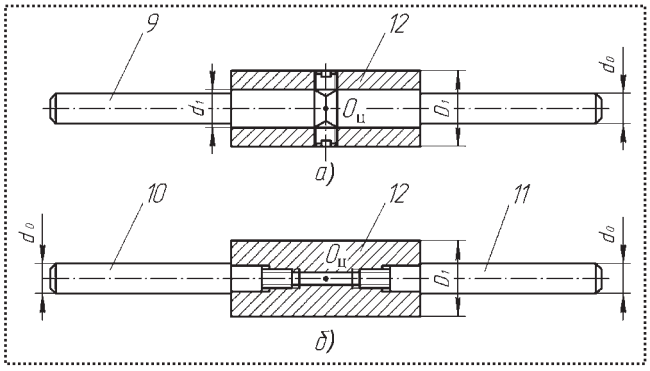


Рис. 2. Составной стержень:
а – груз на штанге; *б* – груз на цапфах

образом сохранялась симметрия относительно оси. Ось груза можно выполнить с эксцентриситетом $e = h$ относительно оси стержня. При этом формула (3) упрощается, так как $4\pi^2 h = 0$.

Дальнейшее расширение технических возможностей прибора связано с его применением для испытания антифрикционных покрытий и смазочных материалов, когда возбуждение фрикционных автоколебаний и, соответственно, использование формулы (3) невозможно. В этом случае работа прибора основана на принципе статического равновесия сил, действующих на стержень.

Пусть стержень *1* (рис. 3) массой m опирается на два желобчатых диска *2* и *3*, а его центр тяжести $O_ц$ находится на одинаковом расстоянии a от осей вращения дисков O_1 и O_2.

Рассмотрим схему действия сил на стержень *1*. Когда диски *2* и *3* не вращаются, реакции в опорах стержня $R_1 = R_2 = mg/2$. При встречном вращении дисков в местах их контакта со стержнем возникнут силы трения F_1 и F_2, и начнется движение стержня в сторону меньшей силы трения до достижения равновесия сил за счет перераспределения опорных реакций, которому соответствует перемещение x стержня.

Условие равновесия сил трения на стержне:

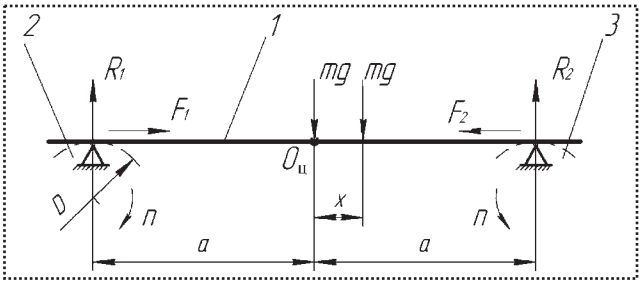


Рис. 3. Схема действия сил на стержень

$$\frac{mg(a-x)}{2a} f_1 = \frac{mg(a+x)}{2a} f_2. \qquad (5)$$

Отсюда отношение коэффициентов трения на дисках:

$$n = \frac{f_2}{f_1} = \frac{1-(x/a)}{1+(x/a)}. \qquad (6)$$

Пользуясь этой зависимостью, можно механическую шкалу *14* прибора градуировать непосредственно в относительных величинах n, выражающих отношение сравниваемых коэффициентов трения f_1 и f_2.

Пусть, например, a = 150 мм. Найдем, на каком расстоянии x от нуля шкалы следует нанести деление, соответствующее n = 0,5.

Согласно (6)

$$\frac{x}{a} = \frac{1}{3}, \text{откуда } x = 50 \text{ мм.}$$

Для испытания смазочных материалов каждый диск должен иметь независимую систему смазывания поверхности трения. При смазывании маслом могут использоваться, например, устройства фитильной смазки *15* (см. рис. 1), погружение диска в ванночку *16*, капельный метод и др. В случае необходимости масло может подогреваться или, наоборот, охлаждаться.

Заметим, что применяемая в приборе схема фрикционного контакта "желоб–валик" используется также в известной лабораторной машине "Falex" для трибологических испытаний смазочных материалов [2].

Порядок работы при сравнении материалов по коэффициентам трения следующий.

При оценке смазочных материалов в одно из смазочных устройств *15* или *16* заливают известное масло, а в другое – исследуемое.

При оценке антифрикционных свойств покрытий целесообразно использовать составной стержень по схеме, приведенной на рис. 2, *б*. При этом одна из цапф *10* или *11* выполнена с известным покрытием, а другая – с новым.

Далее стержень *1* укладывают на диски *2* и *3* и включают привод встречного вращения дисков. По смещению указателя *13* по шкале *14* измеряют величину n.

В отличие от работы в режиме сухого трения, прибор работает в этом случае в условиях стационарного трения, когда фрикционные автоколебания отсутствуют, и стержень с указателем в процессе измерений по шкале находятся в состоянии устойчивого равновесия.

Нарушение такого режима и возникновение колебаний стержня свидетельствуют о нарушении смазочного слоя и могут поэтому служить критерием оценки работоспособности смазочного материала.

Вывод

В режиме экспресс-диагностики предлагаемый прибор может быть использован как трибокомпаратор для сравнения старых и новых материалов по принципу "больше – меньше" ("хуже – лучше") без оценки их абсолютных показателей по коэффициенту трения. Во многих случаях этого достаточно для первичной оценки перспективности новых материалов с минимальными затратами.

Если коэффициент трения одной из сравниваемых фрикционных сопряжений, например f_1, заранее известен, то второй легко определить как $f_2 = f_1 n$, т.е. здесь прибор используется как трибовесы.

Библиографический список

1. **Горбунов В.Н., Смушкович Б.Л.** К методике определения кинетического коэффициента трения на автотрибометре // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2004. Т. 70. № 5. С. 57–59.

2. **Основы** трибологии (трение, износ, смазка) / под ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2001. 663 с.

Контактные координаты автора

Смушкович Бер Лейзерович – главный специалист по испытательной технике,
сл. адрес: 153582, г. Иваново, ул. Лежневская, 183;
тел.: (4932) 42-72-62, 23-29-44; e-mail: ivanovo@tochpribor.ru.

УДК 62.234:539.621:67.02

А.Г. Суслов, *д-р техн. наук (Московский государственный индустриальный университет),*
И.Ю. Цуканов *(Брянский государственный технический университет)*

Конструкторско-технологическое обеспечение износостойкости винтовой пары трения скольжения

Рассмотрено конструкторско-технологическое обеспечение износостойкости винтовой пары трения скольжения, базирующееся на комплексной математической модели процесса ее изнашивания. С помощью полученной модели определяются: трибологические характеристики винтовой пары, зависимость износа ходовой гайки от времени работы винтовой пары, а также степень влияния технологии изготовления резьбы ходовой гайки на ее износостойкость.

The design and engineering wear resistance support of sliding screw pair, based on complex mathematical model of it's wear process is represented in this paper. With the received model we can determine: tribological properties of screw pair, the dependence of lead screw nut's wear on action period of the screw pair, and the effect of nut's thread processing technique on it's wear resistance.

Ключевые слова: винтовая пара, износ, трение, математическая модель, резьба, конструкция, технологические методы.

Key words: screw pair, wear, friction, mathematical model, thread, design, processing technique.

Функциональное назначение винтовых передач скольжения – преобразование вращательного движения в поступательное и наоборот. Несмотря на тот факт, что в большинстве кинематических механизмов передачи с трением скольжения вытесняются передачами с трением качения из-за ряда недостатков, присущих передачам скольжения, таких как низкий КПД, повышенный износ резьбовых поверхностей, малые допустимые скорости скольжения, в настоящее время передачи скольжения находят применение в механизмах, требующих передачи значительных усилий, таких как тяжелые станки, прессы, механизмы разгрузки вагонов, механизмы стрелочных переводов, домкраты, прокатные станы и т.д. В условиях конкурентной борьбы все более повышаются требования к качеству машин. Долговечность узлов, выполняющих основные функции в машине, является значимым фактором, определяющим ее качество в целом. Винтовая передача скольжения представляет собой пару трения винт–гайка, работающую в условиях значительных нагрузок. Поэтому основным эксплуатационным свойством, определяющим долговечность винтовой пары скольжения, является износостойкость резьбовых поверхностей ее элементов, т.е. винта и гайки.

Ходовой винт обычно изготавливается из углеродистой или легированной стали и подвергается закалке до твердости 55...60 HRC. Гайка изготавливается из более мягких материалов: оловянистых или безоловянистых бронз, цинковых сплавов, неметаллических материалов. Поэтому витки ходовой гайки будут изнашиваться быстрее витков ходового винта. Следовательно, долговечность винтовой передачи скольжения будет в основном определяться износостойкостью витков резьбы ходовой гайки. Требуемая износостойкость должна обеспечиваться на всех этапах жизненного цикла изделия, но закладывается она, прежде всего, при проектировании и изготовлении. В связи с этим возникают соответствующие задачи для конструктора и технолога. Конструктору необходимо, исходя из условий работы и требуемого срока службы передачи, подобрать конструктивные параметры, материалы, точность и параметры качества поверхностного слоя ее деталей, прежде всего – ходовой гайки, а технологу

– выбрать соответствующий метод обработки, позволяющий получить резьбу заданного конструктором качества с минимальной себестоимостью.

1. Математическая модель изнашивания винтовой пары трения скольжения

В связи с необходимостью решения обозначенных выше задач конструктора и технолога актуальным вопросом является создание комплексной математической модели, которая позволила бы рассчитывать трибологические характеристики винтовой пары трения с учетом конструкторских и технологических факторов, давая возможность определить размеры, материал ходовой гайки, а также необходимый метод обработки резьбы для достижения заданного срока службы ходовой гайки при заданных условиях работы пары трения.

Предлагаемая математическая модель основывается на молекулярно-механической теории трения И.В. Крагельского [2], исследованиях в области качества поверхности, контактной жесткости и их технологического обеспечения [3], а также на решении И.А. Биргера задачи о распределении усилий по виткам резьбы [4]. На ее основании **можно определить следующие трибологические характеристики по зависимостям.**

1. *Интенсивность изнашивания резьбы ходовой гайки:*

- для периода приработки:

$$I_{h\text{пр}\,i} = \frac{58{,}8 p_i^{7/6} Wz^{1/6} H_{\max}^{1/6} Ra^{1/6} \left(3\tau_0 + 3\beta H_{\mu\ \text{пов}} + \frac{2439 p_i^{1/6} H_{\mu\ \text{пов}}^{4/3} Wz^{1/6} H_{\max}^{1/6} (1-\mu^2)^{1/2} Ra^{1/6}}{E^{1/2} Sm^{1/2} tm} \right)^t}{N(\sigma_{\text{в}} - \sigma_{\text{ост}})^t H_{\mu\ \text{пов}}^{7/6} E^{1/2} Smtm} \times$$
$$\times \left(1 + \left(\frac{\tau_0}{H_{\mu\ \text{пов}}} + \beta + \frac{813 p_i^{1/6} H_{\mu\ \text{пов}}^{1/3} Wz^{1/6} H_{\max}^{1/6} (1-\mu^2)^{1/2} Ra^{1/6}}{E^{1/2} Sm^{1/2} tm} \right)^2 \right)^{1/4} \sqrt{(5{,}797 RaE + 36{,}42 H_{\mu\ \text{пов}} Sm(1-\mu^2))}, \quad (1)$$

где p_i – номинальное контактное давление на витке гайки в период приработки, Па;

Wz – средняя высота волн, м;

$H_{\max}$ – максимальная величина макроотклонения, м;

Ra – среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости, м;

τ_0 и β – параметры, определяемые экспериментально и учитывающие соответственно условия смазывания и скорость скольжения;

$H_{\mu\ \text{пов}}$ – микротвердость боковой поверхности резьбы гайки, Па;

μ – коэффициент Пуассона;

t – параметр контактно-фрикционной усталости;

E – модуль упругости Юнга материала гайки, Па;

Sm – средний шаг неровностей профиля шероховатости, м;

tm – относительная опорная длина профиля на уровне средней линии, %;

N – число циклов воздействия, приводящее к разрушению материала;

$\sigma_{\text{в}}$ – предел прочности материала гайки на разрыв, Па;

$\sigma_{\text{ост}}$ – величина поверхностных остаточных напряжений, Па.

Номинальное контактное давление на витке гайки в период приработки определяется из решения задачи о нахождении усилий на каждом из витков резьбы [4] по формуле

$$p(z) = q(z)\frac{S}{f_{\text{б}}}, \quad (2)$$

где $q(z)$ – интенсивность распределения нагрузки по высоте гайки [4];

Рис. 1. Интенсивность изнашивания витков резьбы 13-витковой гайки в период приработки и нормального изнашивания

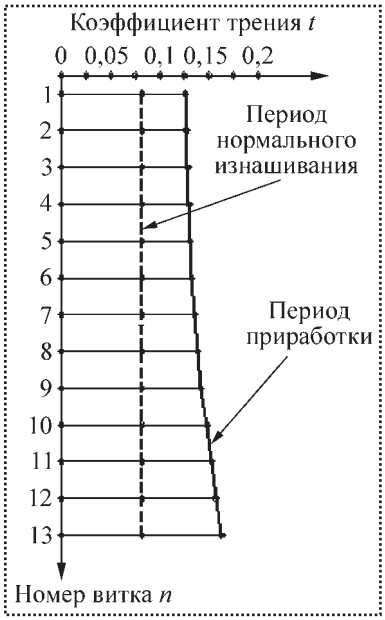


Рис. 2. Коэффициент трения витков резьбы 13-витковой гайки в период приработки и нормального изнашивания

$f_б$ – проекция боковой поверхности витка на плоскость, перпендикулярную оси винта z, м;

S – толщина основания витка, м;

• для периода нормального изнашивания:

$$I_{hн} = \frac{355 p_0^{7/6} Wz^{1/6} H_{max}^{1/6} Ra^{1/6} (3\tau_0 + 3\beta K_И H_{\mu\ пов})^t (1-\mu^2)^{1/2}}{N(\sigma_в - \sigma_{ост})^t H_{\mu\ пов}^{2/3} E^{1/2} Sm^{1/2} tm} \left[1 + \left(\frac{\tau_0}{K_И H_{\mu\ пов}} + \beta\right)^2\right]^{1/4}, \quad (3)$$

где $I_{hн}$ – интенсивность изнашивания витков ходовой гайки в период нормального изнашивания;

p_0 – номинальное контактное давление на витках резьбы гайки в период нормального изнашивания, Па (определяется из условия равномерного распределения нагрузки по виткам);

$K_И$ – коэффициент, учитывающий уменьшение фактического контактного давления в период нормального изнашивания за счет увеличения фактической площади касания.

2. *Коэффициент трения в резьбе:*

• в период приработки

$$f_{i\,пр} = \frac{\tau_0}{H_{\mu\ пов}} + \beta + \frac{813 p_i^{1/6} H_{\mu\ пов}^{1/3} Wz^{1/6} H_{max}^{1/6} (1-\mu^2)^{1/2} Ra^{1/6}}{E^{1/2} Sm^{1/2} tm}; \quad (4)$$

• в период нормального изнашивания

$$f_н = \frac{\tau_0}{H_{\mu\ пов}} + \beta. \quad (5)$$

3. *Суммарный момент трения в резьбе*

$$M_\Sigma = \sum_{i=1}^{n} \frac{4\pi^2}{3} \left(\frac{D_2^3 - D_1^3}{8}\right) f_{i\,пр} p_i, \quad (6)$$

D_2 – средний диаметр резьбы ходовой гайки;

D_1 – внутренний диаметр резьбы ходовой гайки;

n – число витков ходовой гайки.

Во всех зависимостях i – номер витка, учитывая, что для периода приработки все трибо-

логические характеристики вычисляются для каждого витка в отдельности, что связано с неравномерностью их нагружения [4].

Результаты расчета трибологических характеристик по математической модели, а именно интенсивности изнашивания и коэффициента трения витков резьбы 13-витковой бронзовой ходовой гайки, имеющей метрическую резьбу типоразмером М24, при осевой нагрузке 500 Н для периода приработки и периода нормального изнашивания приведены на рис. 1 и 2.

2. Моделирование процесса изнашивания винтовой пары во времени

Для того чтобы определить долговечность винтовой пары трения, необходимо построить график зависимости износа от времени И(t). Зная допустимую величину износа И, можно определить срок службы передачи. В период приработки витки нагружены неравномерно, и в процессе приработки эта неравномерность устраняется за счет неравномерного износа витков. При этом интенсивность изнашивания первых по отношению к нагрузке витков будет снижаться, а последних – повышаться за счет выравнивания нагрузки.

Чтобы получить зависимости интенсивностей изнашивания витков во времени, был поставлен машинный эксперимент. Основой для данного эксперимента является аналогия между неравномерным износом витков и прогрессирующей погрешностью шага резьбы (согласно исследованиям И.А. Биргера [4]).

Для учета прогрессирующей погрешности шага резьбы были изменены соответствующие уравнения в математической модели. Исходя из кинематики винтового механизма, вычислим значение текущего износа за время t работы:

$$И(t) = I_h \frac{Pn_0 t}{\sin\varphi}, \qquad (7)$$

где И(t) – величина износа за время t, м;

I_h – интенсивность изнашивания в текущий момент периода приработки;

P – шаг резьбы, м;

n_0 – частота вращения ходового винта, мин$^{-1}$;

t – время, с;

φ – угол подъема резьбы, °.

Затем полученное значение износа подставлялось в математическую модель в виде значения прогрессирующей погрешности шага резьбы. Используя механизм перераспределения нагрузки при увеличении прогрессирующей погрешности шага, итерационным способом были вычислены значения интенсивностей изнашивания витков в различные промежутки времени периода приработки. Были получены зависимости интенсивностей изнашивания витков во времени в период приработки, представляющие собой прямые, сходящиеся в одну точку, соответствующую равномерному распределению нагрузки по виткам, т.е. окончанию периода приработки.

Путем математической обработки полученных данных было установлено, что средний износ по виткам во времени в период приработки изменяется по той же зависимости, что и износ каждого витка в период нормального изнашивания, что доказывает тот факт, что износ по виткам, так же как и нагрузка, перераспределяется во времени.

Чтобы построить график зависимости износа винтовой пары во времени, необходимо математически отразить процесс ее изнашивания. Любая передача имеет зазор между витками винта и гайки, определяемый погрешностью шага при изготовлении ее деталей. Однако вследствие различных контактных деформаций витков, вызванных неравномерным распределением нагрузки, этот зазор выбирается неодинаково. Если контактные деформации превышают имеющийся зазор, то витки вступают в контакт.

Очевидно, что величина износа винтовой передачи, являющаяся люфтом между гай-

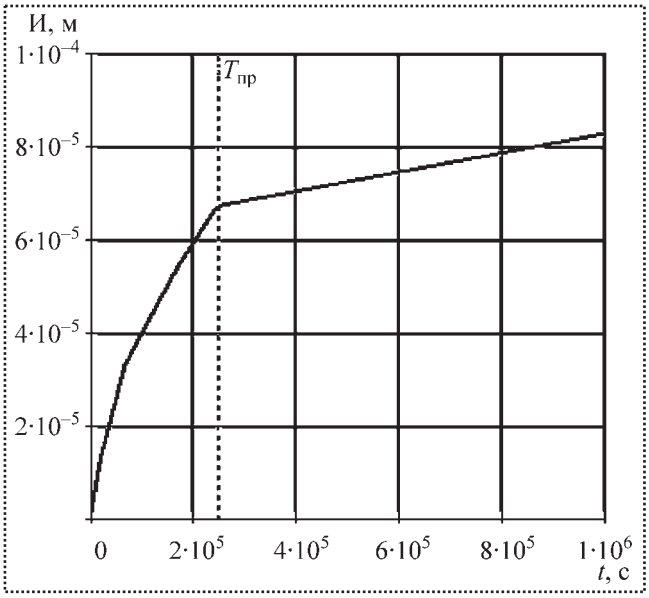


Рис. 3. Зависимость износа И винтовой пары от времени *t* работы

кой и винтом, в начальный период времени будет определяться износом наименее нагруженного витка из тех, что вступили в контакт. После того как величина износа этого витка превысит значение зазора, определяемого разностью погрешности шага и величины контактных деформаций следующего витка, в контакт вступит следующий виток. При этом изменятся характер распределения нагрузки по виткам и интенсивность изнашивания витков. Кроме того величина износа винтовой пары зависит от величины износа следующего витка, вступившего в контакт. И это будет до тех пор, пока все витки не вступят в контакт, и нагрузка между ними не распределится равномерно. При этом заканчивается период приработки и начинается период нормального изнашивания, характеризуемый постоянной интенсивностью изнашивания всех витков. Задача состояла в том, чтобы вычислить момент времени, при котором значение износа предыдущего витка ходовой гайки превышает зазор между следующими витками винта и гайки. После этого меняется характер изнашивания передачи, который теперь определяется изнашиванием следующего витка. Зазор между витками в момент приложения нагрузки можно определить по формуле

$$З_i = \delta_р - Y_{к_i}, \qquad (8)$$

где $З_i$ – зазор между витками, м;

$\delta_р$ – зазор, вызванный погрешностью шага резьбы, м;

$Y_{к_i}$ – величина контактных деформаций витков, определяемая согласно [3].

После этого в математической модели были запрограммированны циклы по вычислению значений износа витков во времени с учетом зависимостей изменяющихся интенсивностей изнашивания витков, найденных ранее. Цикл прерывался, как только значение износа $И_i$ превышало значение зазора $З_i$. С помощью этих циклов были вычислены отрезки кривых, определяющих износ винтовой пары на определенном промежутке времени периода приработки. Таким образом, график износа винтовой пары трения скольжения в период приработки представляет собой кусочную функцию, а в период нормального изнашивания – прямую, что объясняется постоянной интенсивностью изнашивания витков. Пример полученного по математической модели графика изображен на рис. 3

3. Влияние технологии изготовления ходовой гайки на износостойкость винтовой пары

Зависимости математической модели, определяющие трибологические характеристики винтовой пары трения скольжения, учитывают факторы, зависящие от технологии изготовления резьбы ходовой гайки. К ним можно отнести:

1. Технологические погрешности изготовления профиля резьбы (погрешности диаметральных размеров, погрешность по шагу, погрешность по углу профиля), которые учитываются при нахождении номинального контактного давления p_i.

2. Параметры качества боковой поверхности резьбы ходовой гайки, непосредст-

венно учитываемые в зависимостях (1), (3)–(6). К ним относятся: геометрические, т.е. параметры макроотклонения, волнистости и шероховатости поверхности; физико-механические, т.е. микротвердость боковой поверхности резьбы гайки и величины поверхностных остаточных напряжений.

При варьировании вышеуказанных технологических факторов данной модели было установлено, что наибольшее влияние на износостойкость резьбы винтовой пары скольжения оказывают поверхностная микротвердость, параметры шероховатости, величина и знак остаточных напряжений. Диаграмма влияния технологических факторов на интенсивность изнашивания резьбы ходовой гайки представлена на рис. 4.

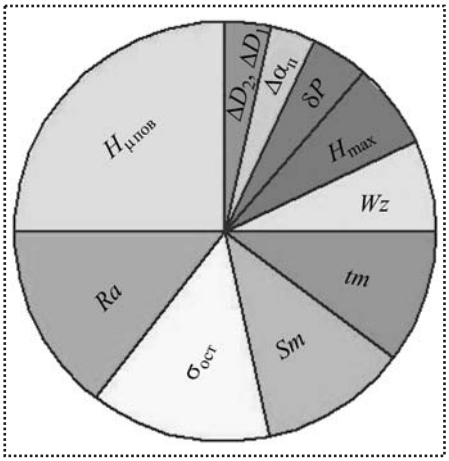


Рис. 4. Диаграмма степени влияния технологических факторов на интенсивность изнашивания резьбы

Решение задачи технолога по поиску оптимального метода получения резьбы ходовой гайки для конкретных условий работы пары трения и соответствующего срока ее службы находится путем подстановки в математическую модель численных значений точности профиля и качества боковой поверхности резьбы, достигаемых различными технологическими методами, и последующего выбора наиболее оптимального метода по критерию износа.

К основным методам получения резьбы в ходовых гайках относятся:

1. Нарезание резцом. Этот метод является наиболее универсальным. Однако точность и качество резьбы, получаемой данным методом на универсальном оборудовании, – невысокие. Этот метод используется для неточных ходовых гаек. На современном токарно-многоцелевом оборудовании при применении прогрессивного инструмента можно добиться высокого качества резьбы.

2. Нарезание метчиком или комплектом метчиков. Этот способ обеспечивает более высокое качество резьбы, чем резцом на универсальном станке, применяется для мелких и средних ходовых гаек. В основном в мелкосерийном производстве.

3. Обработка пластическим деформированием (раскатник) или комбинированная обработка (метчик-раскатник). Данный метод обеспечивает не только хорошие геометрические параметры качества поверхностного слоя, но и наилучшие физико-механические свойства (поверхностная микротвердость и остаточные напряжения). Недостаток данного способа – сложность раскатки гаек из черных металлов, однако существуют конструкции твердосплавных раскатников, позволяющих раскатывать резьбу в стальных гайках. Комбинированная обработка резанием-деформированием дает возможность нарезать с последующим раскатыванием резьбы в стальных гайках и осуществлять обработку резьбы одним инструментом без предварительного нарезания под раскатывание.

Класс точности и численные значения параметров качества поверхностного слоя резьбы ходовых гаек, получаемые наиболее распространенными технологическими методами, представлены в табл. 1.

Путем подстановки вышеуказанных данных в математическую модель был произведен сравнительный расчет интенсивностей изнашивания в период приработки и нормального изнашивания для 13-витковой бронзовой ходовой гайки, имеющей метрическую резьбу типоразмером М24, полученную различными технологическими методами, при осевой нагрузке 500 Н. Результаты расчета представлены на рис. 5 и 6.

Наибольшую износостойкость витков резьбы, согласно расчету, обеспечивает обработка раскатыванием, особенно в период

1. Êëàññ ÷è ñòè è ÷èñëåí ûå çí à÷åí èÿ ïàðàì åòðî â êà÷åñòâà ïî âåðõí îñòî ãî ñëî ÿ ðåçüáû õî äî - âû õ ãàåê, ï î ëó÷àåì ûå í àèáî ëåå ðàñï ðî ñòðàí åí í ûì è òåõí î ëî ãè÷åñêèì è ì åòî äàì è

Метод обработки	Класс точности	Параметры качества поверхностного слоя резьбы						
		H_{max}, мкм	*Wz*, мкм	*Ra*, мкм	*Sm*, мм	*tm*, %	*Uh*, %	$\pm\sigma_{ост}$, МПа
Нарезание резцом	2...3	3...10	3...20	1,6...4,0	0,08...0,25	30...35	10...30	150...250
Нарезание метчиком	3	4...12	2...15	1,25...3,2	0,063...0,2	30...35	10...40	200...300
Обработка деформированием (раскатывание)	1...2	2...6	4...12	0,8...2,5	0,063...0,15	70...75	50...80	200...400

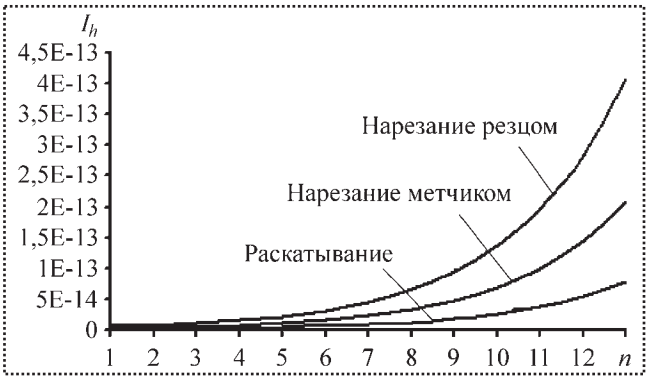


Рис. 5. Сравнительный расчет интенсивности изнашивания I_h витков *h* резьбы, полученный различными методами в период приработки

нормального изнашивания, за счет высокой поверхностной микротвердости получаемой резьбы и создания сжимающих остаточных напряжений, повышающих контактную выносливость трущихся резьбовых поверхностей.

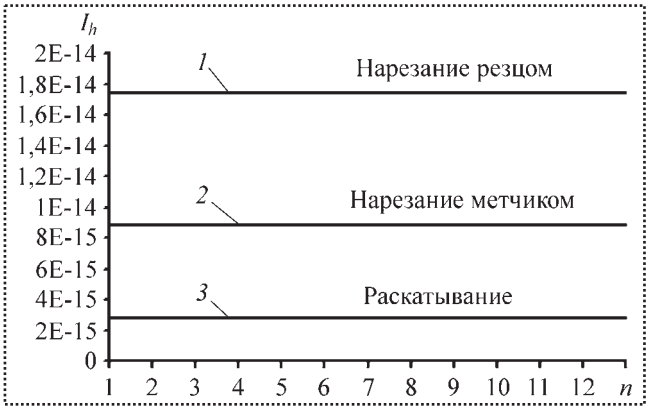


Рис. 6. Сравнительный расчет интенсивности изнашивания витков резьбы, полученный в период нормального изнашивания при:
1 – нарезании резцом; *2* – нарезании метчиком; *3* – раскатывании

4. Экспериментальные исследования трения в винтовых парах скольжения

Для экспериментальной проверки результатов математического моделирования использовалась установка для исследования винтовых пар с трением скольжения, разработанная на кафедре "Автоматизированные технологические системы" Брянского государственного технического университета (рис. 7). Была проведена модернизация установки, которая позволила проводить измерения коэффициента трения в резьбе в реальном времени. Принцип измерения заключался в следующем: под воздействием сил трения в резьбе гайка вместе с установленным на ней бандажом получает угловое смещение относительно винта. При этом тензобалка, жестко закрепленная одним концом на бандаже, а другим концом опирающаяся на стенки паза, расположенного параллельно оси винта, изгибается. Изменяющееся при изгибе напряжение с тензодатчиков передается на АЦП, а затем на ЭВМ, где с помощью тарировочных зависимостей преобразуется в значение коэффициента трения.

Для исследования влияния способа получения резьбы в ходовых гайках на коэффициент трения были изготовлены экспериментальные образцы. Материал образцов – бронза БрО10Ф1. Резьба в образцах была получена

Рис. 7. Модернизированная установка для исследования винтовых пар трения

2. Ñðàâí åí èå ðåçóëüòàòî â ýêñï åðèì åí òà è äàí - í ûõ, ï î ëó÷åí í ûõ ï î ï ðåäëî æåí í î é ì î äåëè

Метод обработки резьбы	Коэффициент трения в период приработки, рассчитанный по модели	Экспериментальный коэффициент трения в период приработки
Нарезание резцом	0,15	0,2
Нарезание метчиком	0,155	0,155
Раскатывание	0,115	0,13

с помощью резца, метчика и раскатника. Затем на установке образцы испытывались по 10 ч. Выборка результатов обработки экспериментальных данных приведена на рис. 8.

Сравнение результатов эксперимента и данных, полученных по модели, приведены в табл. 2.

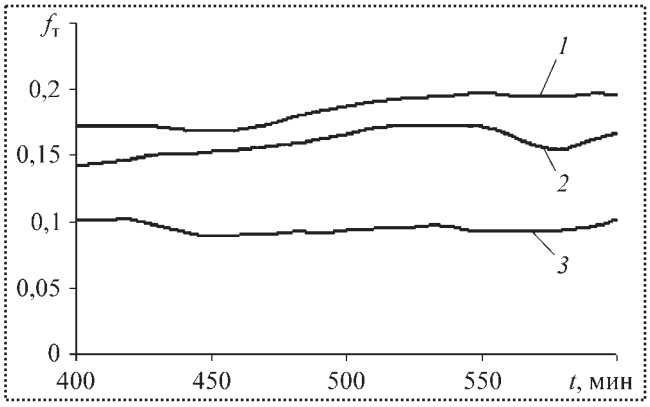


Рис. 8. Экспериментальные зависимости коэффициента трения $f_т$ от времени t, полученные при:
1 – нарезании резцом; *2* – нарезании метчиком; *3* – раскатывании

Заключение

Полученная в среде вычислений MathCAD комплексная математическая модель изнашивания винтовой пары трения скольжения позволяет рассчитывать трибологические характеристики винтовой пары в зависимости от конструктивных и технологических факторов, тем самым упрощая решение задач конструктора и технолога. Кроме того, она позволяет определить механизм изнашивания витков в период приработки, определить время периода приработки и построить полный график износа пары во времени, что позволяет более точно определять оптимальную конструкцию и технологию изготовления резьбы ходовой гайки, для достижения необходимого срока службы винтовой передачи.

Значения коэффициентов трения, полученные по математической модели, хорошо согласуются с экспериментальными данными и литературными источниками. Следовательно, данную модель можно применять при проектировании винтовых передач скольжения.

Библиографический список

1. **Турпаев А.И.** Винтовые механизмы и передачи М.: Машиностроение. 1982. 223 с.

2. **Крагельский И.В., Михин Н.М.** Узлы трения машин: Справочник. – М.: Машиностроение, 1984. 280 с.

3. **Суслов А.Г.** Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение. 2000. 318 с.

4. **Биргер И.А., Иосилевич Г.Б.** Резьбовые соединения. М.: Машиностроение. 1973. 256 с.

Контактные координаты авторов:

Цуканов Иван Юрьевич – e-mail: werth32@mail.ru.

УДК 621.891:539.62

В.Г. Копченков, *д-р техн. наук (Северо-Кавказский государственный технический университет, г. Ставрополь)*

Виды и механизмы изнашивания резин в условиях контактно-динамического нагружения

Разработаны модели поверхностного разрушения и механизмы изнашивания эластомеров для различных условий контактно-динамического нагружения. Установлены основные факторы, определяющие повышение долговечности гуммированных деталей машин.

Ivestigation allow to work out specials models and mechanisms destroy and wear of the rubber surface by the abrasive particles in the conditions contactly-dynamical loading. Fixed basis factores have influence to the long-lived rubber elements.

Ключевые слова: износ резины, механизмы износа, контактно-динамическое нагружение поверхности.

Key words: wear of the rubber, mechanisms wear, compactly-dynamical loaded surface.

Анализ позволяет выделить большую группу деталей машин и оборудования, подвергающихся изнашиванию вследствие ударного воздействия твердых абразивных частиц, двигающихся с различными скоростями. Отличительными признаками трибоконтакта являются: переменная по величине, времени и направлению действия сила, т.е. динамический характер воздействия, кратковременность, дискретность контакта, а также малая величина или отсутствие длительного скольжения или качения. Совокупность этих признаков позволила терминологически определить характер нагружения как контактно-динамический. Он включает в себя и ударный, и безударный режим контактного нагружения.

Закономерности изнашивания в условиях контактно-динамического нагружения исследовались в ряде работ [1–8]. Для уменьшения интенсивности изнашивания предложены различные методы защиты рабочих поверхностей.

В последние годы при конструировании промышленного оборудования, предназначенного для работы в различных абразивных средах стали все шире использовать принцип податливости. Наиболее полно роль податливости проявляется в гуммированных деталях машин [1].

В работах [1–3] было показано, что износ гуммированных деталей в потоке твердых частиц имеет релаксационную природу, которая обуславливает существование критической скорости удара и переход к наиболее опасному, квазихрупкому механизму износа резин при критических и сверхкритических скоростях удара частиц, что ограничивает их применение.

Дальнейшее повышение износостойкости резиновых футеровок в значительной степени связано с изучением механизма разрушения резин при контактно-динамическом нагружении для скоростей ниже критических.

Изнашивание эластомеров потоком частиц в условиях ударного нагружения поверхности имеет свои особенности и существенно отличается от простого скольжения. В настоящее время для этих условий нет классификации видов изнашивания, сформировавшегося представления о механизме изнашивания и этапах разрушения эластомеров в потоке твердых частиц. Для того чтобы получить ответы на эти важные вопросы, весь комплекс явлений при изнашивании и факторы, определяющие характер протекания процессов разрушения, разделены на более простые составляющие его части и проведено их исследование. Исследования проводились применительно к абразивным частицам с достаточно высокой степенью окатанности.

Первоначально были выяснены этапы эволюции поверхностного разрушения резины в условиях единичного удара частицы под прямым углом, затем под произвольным углом к поверхности резины [9, 11]. На следующем этапе исследовалось изменение топографии изнашиваемой поверхности в условиях множественного удара. Множественный удар создавался потоком частиц абразива с помощью центробежного ускорителя и пескоструйной установки. Для исследования механизма разрушения при гидроабразивном изнашивании была применена установка струеударного типа [1].

Анализ топографии поверхностного слоя при прямом ударе частицы позволил установить, что существуют два различных механизма изнашивания: деструкционный и "выкрашиванием".

В результате периодического воздействия на материал в объеме диссипации энергии складываются различные по уровню деструкции материала состояния в зависимости от глубины его расположения от поверхности. Тонкий поверхностный слой подвергается особо интенсивной усталостной деструкции. Под действием поля механических и температурных деформаций происходит разрыв межмолекулярных и внутримолекулярных химических связей. В результате поверхностный слой разрыхляется, и резко уменьшаются его прочностные свойства. На модели изнашивания (см. таблицу) показаны этапы развития этого процесса. На первом этапе происходит дилатация материала поверхности, на втором – формирование на поверхности "чешуйки", которая на третьем этапе отслаивается и отделяется от основного материала фрагментами круглой или дугообразной формы. Структура чешуйки резин отличается от структуры основного материала. Чешуйка представляет собой деструктированный в результате термомеханической усталости поверхностный слой резины.

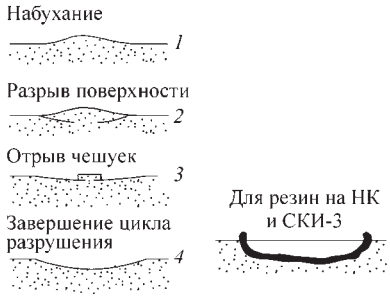
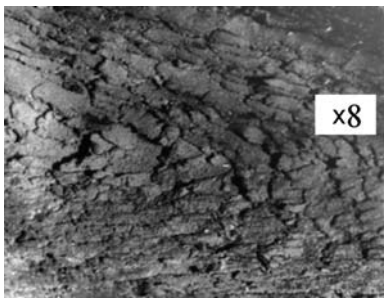
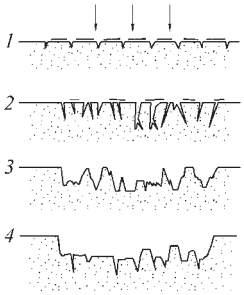
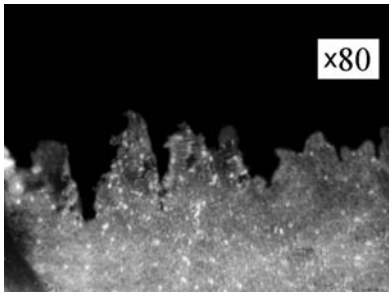
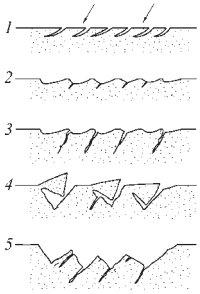
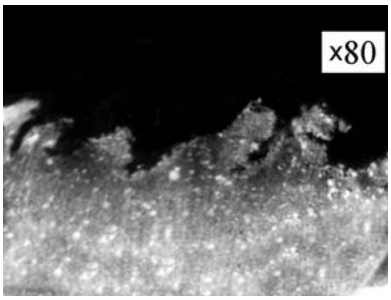
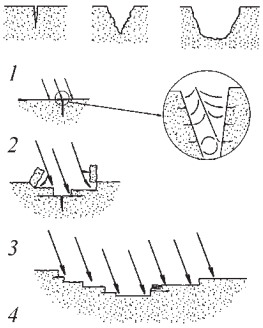
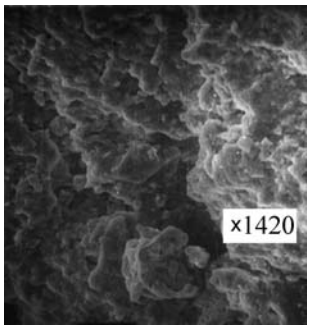
Необходимо отметить, что наблюдалась деструкция двух типов, зависящая от вида каучука. Резины на каучуках СКС-30АРКМ-15 и СКД деструктировали по описанному механизму. Резины на основе натурального каучука и СКИ-3 давали другую картину. При деструкции выделялась темная жидкая маслянистая фаза, налипающая на индентор. С увеличением энергии удара повышается доля износа поверхности по механизму "выкрашивания". В качестве критерия можно принять глубину внедрения частицы h при ударе к ее радиусу r.

При $h/r < 0{,}2$ характерно изнашивание по деструкционному механизму, а при $h/r > 0{,}4$ – изнашивание вследствие выкрашивания.

При прямом ударе частицы на периметре пятна контакта возникает кольцевая зона максимальных напряжений [11]. Поэтому по периметру пятна контакта при очередном ударе на микротрещинах как зародышах образуются фрагменты кольцевой трещины. Многократное нагружение поверхности ведет к развитию трещин в глубь поверхностного слоя. Направление развития трещин меняется от расходящегося до сходящегося к центру пятна контакта в зависимости от величины силы удара частицы. Соответственно, происходит пересечение и слияние развивающихся трещин, сопровождающееся отделением фрагмента материала. В таблице представлена модель развития поверхностного разрушения по механизму выкрашивания, включающая этапы: 1 – образование зародышевых микротрещин; 2 – развитие трещин с изменением их направления; 3 – пересечение и слияние трещин; 4 – образование микрорельефа изношенной поверхности. Глубина изношенного слоя определяется глубиной раздира трещин и составляет 0,05...0,2 мм. На поверхности образуется бугристо-столбчатый микрорельеф. После этого процесс изнашивания возобновляется со второго этапа.

В условиях удара частицы под углом к поверхности возникает сложное напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя, способствующее возникновению и

Ì åõàí èçì û èçí àø èâàí èÿ è ì î äåëè ï î âåðõí î ñòí î ãî ðàçðóø åí èÿ ðåçèí (1–5 – ýòàï û ðàçðóø åí èÿ)

Механизм изнашивания	Модель развития поверхностного разрушения	Характерная топография и рельеф поверхности
Деструкционный (отслаивание)		
Выкрашивание		
Задирный		
Расслаивание		

развитию в нем трещины, близкой по направлению к углу атаки частицы [10].

Модель развития поверхностного разрушения при косом ударе (табл. 1) по "задирному" механизму изнашивания включает несколько этапов. На первом этапе в тонком слое на поверхности контакта (h = 0,01...0,05 мм) происходит быстрое "утомление" материала со сни-

жением прочности. В результате образуются микротрещины под углом 10...15° к поверхности. На втором этапе происходит задир поврежденных участков. Резиновая поверхность при этом теряет глянцевитость. При большом радиусе частиц и малой нагрузке процесс разрушения может стабилизироваться на этом этапе. На третьем этапе при достижении необходимого снижения уровня усталостной прочности поверхностного слоя начинается его раздир уже под углом атаки. На четвертом этапе трещины достигают своей предельной глубины и под действием системы сил поворачивают под углом 90° к своему первоначальному направлению, в сторону менее прочного материала. Происходит задир и отделение фрагмента материала. На пятом этапе окончательно формируется поверхность износа. Новый цикл разрушения начинается с третьего этапа после достижения необходимой степени разупрочнения резины.

Для изношенной поверхности характерен гребенчатый рельеф. С увеличением угла атаки шаг гребней уменьшается и после угла атаки α = 50...60° система гребней переходит в бугристую поверхность. Глубина задиров с увеличением угла атаки также снижается за счет того, что развитие поперечной трещины может начинаться в любом месте по длине первоначальной.

Изменение среды, несущей абразив, оказывает существенное влияние на механизм и закономерности поверхностного разрушения резины. Во-первых, высокая плотность несущей среды. Для газоабразивного потока соотношение плотности абразива и среды составляет 2500...3500, а для гидроабразивного на три порядка меньше. Плотность абразива всего в три раза больше плотности воды. Вязкость воды в 50 раз больше вязкости воздуха. В результате свобода движения абразивной частицы существенно уменьшается, и она подчиняется законам движения жидкости. Высокая плотность и, соответственно, энергоемкость среды ведет к тому, что сама среда оказывает значительное разрушающее воздействие, особенно если развивается кавитация.

Исследование рельефа резиновых образцов, изношенных в гидроабразивной струе, показало, что он имеет складчатую структуру. Академиком В.А. Каргиным [12] было доказано, что даже аморфные полимеры с нерегулярным строением макромолекул дают образования с высокой степенью упорядоченности. Для ненаполненных резин на натуральном и бутадиенстирольном каучуке отмечается образование ленточных структур шириной около 1 мкм. Толщина складок, обнаруженных в наших опытах, соответствует размеру надмолекулярных структур в резинах, т.е. разрушение резины при изнашивании связано с отмеченными надмолекулярными структурами. Связи между структурами слабее, чем внутри этих структур, поэтому разрушение идет за счет отделения одного слоя от другого.

Суммируя приведенные результаты исследования, можно представить модель разрушения резины при гидроабразивном изнашивании (см. таблицу). На начальном этапе на поверхности резины, находящейся под действием агрессивных составляющих гидроабразивного потока (абразивных частиц, кавитационных пузырей), образуются микротрещины, микропорезы или сравнительно большие по размерам каверны. На следующем этапе микроструи воды, обладающие значительным запасом энергии, разрывают более слабые связи между надмолекулярными структурами. При этом создается расклинивающий эффект, благодаря которому происходит отрыв одного микрослоя надмолекулярной структуры резины от другого.

Чем ближе к поверхности микрослой, тем меньше энергии необходимо на его отделение, поэтому постепенно формируется ступенчатое в сечении углубление на поверхности. Скорость его расширения значительно выше скорости углубления. Это объясняет тот факт, что резиновые образцы, изношенные в гидроабразивном потоке, имеют значительно

более гладкую поверхность износа по сравнению с другими видами изнашивания.

Сформулированный механизм гидроабразивного изнашивания можно назвать механизмом "расслаивания" поверхностного слоя резин.

Проведенные исследования создают основы механики контактного разрушения эластомеров в условиях контактно-динамического нагружения, так как позволили установить этапы и эволюцию разрушения резин, виды и механизмы изнашивания. Это дает возможность повысить износостойкость резин на базе новых представлений о роли и значении ряда их физико-механических свойств.

Библиографический список

1. **Пенкин Н.С.** Гуммированные детали машин. М.: Машиностроение, 1977. 200 с.
2. **Бартенев Г.М., Пенкин Н.С.** Релаксационная природа износа резин в потоке абразивных частиц // Трение и износ. 1980. Т. 1. № 4. С. 584–594.
3. **Пенкин Н.С.** Энергетический подход к оценке износостойкости высокоэластичных материалов в потоке твердых частиц // Трение и износ, 1981. Т. 2. № 3. С. 459–467.
4. **Бродский Г.И., Евстратов В.Ф., Сахновский Н.Л., Слюдиков А.Д.** Истирание резин. М.: Химия, 1975. 240 с.
5. **Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольников М.Г.** Абразивное изнашивание. М.: Машиностроение, 1990. 207 с.
6. **Морозов Е.М., Зернин М.В.** Контактные задачи механики разрушения. М.: Машиностроение, 1999. 544 с.
7. **Копченков В.Г., Пенкин Н.С.** Экспериментальное исследование механизма контактного взаимодействия твердой частицы с эластичной поверхностью при ударе // Трение и износ. 2001. Т. 22. № 6. С. 640–649.
8. **Тененнбаум М.М.** Сопротивление абразивному изнашиванию. М.: Машиностроение, 1976. 271 с.
9. **Копченков В.Г.** Модель изнашивания резины для прямого удара потоком частиц // Каучук и резина. 2003. № 4. С. 25–29.
10. **Копченков В.Г., Пенкин Н.С., Сербин В.М.** Механизм изнашивания эластомерных материалов под воздействием транспортируемых абразивных сред // Сб. докл. Межунар. конгресса "Механика и трибология транспортных систем" Ростов/Дон. РГУПС. 2003. С. 27–30.
11. **Копченков В.Г.** Теоретико-экспериментальное исследование образования трещин при ударе твердой частицы по поверхности резины // Трение и износ. 2002. Т. 23. № 6. С. 619–622.
12. **Каргин В.А., Слонимский Г.Л.** Краткие очерки по физико-химии полимеров. М.: Химия, 1967. 232 с.

Контактные координаты автора:

Копченков Вячеслав Григорьевич – зав. кафедрой "Прикладная механика и основы конструирования"; тел.: 8 (865-2) 95-67-39, 95-68-02, e-mail: dm@stv,runnet.ru.

УДК.621.892:620.1(665.76:621.891)

С.И. Крахмалёв, *д-р техн. наук,* **Н.В. Таранова,** *канд. техн. наук (ОАО ВНИИ НП)*

Состав пластичных смазок и формирование смазочного слоя в трибосопряжении вал–втулка

На примере пластичных смазок, изготовленных на углеводородных жидкостях и сложных эфирах различного строения, показано, что толщина смазочного слоя, образуемого такими смазками в подшипнике вал–втулка при качательном движении, зависит от природы дисперсионной среды, состава и количества дисперсной фазы. Выбранным сочетанием жидкости и загустителя определяется диапазон скоростей скольжения, в котором реализуется образование и сохранение смазочного слоя.

By the example of greasy lubrications made of hydrocarbon liquids and esters of different structures it is shown the lubricating layer thickness formed with such greases in a shaft – barrel bearing in wobbling moving depends on the nature of dispersive medium, composition and quantity of disperse phase. The range of slip velocity is determined by the chosen combination of liquid and thickening agent where forming and keeping of lubricating layer are realized.

Ключевые слова: подшипник вал–втулка, толщина смазочного слоя, дисперсионная среда, дисперсная фаза.

Key words: shaft – barrel bearing, lubricating layer thickness, dispersive medium, disperse phase.

По продолжительности работы в подшипниках скольжения пластичные смазки (ПС) уступают смазкам, применяемым в подшипниках качения. Зависимость работоспособности смазки от ее состава и свойств становится очевидной с увеличением скорости скольжения и особенно в случае одновременного увеличения и скорости, и нагрузки на узел трения.

В представленной статье изложены результаты изучения влияния дисперсной фазы пластичных смазок на формирование и толщину смазочного слоя в узле трения вал–втулка при качательном движении вала.

Одним из путей повышения эффективности ПС в узлах трения скольжения является придание пластичным смазкам свойств, обеспечивающих образование смазочного слоя, устойчивого в широком диапазоне изменения скорости V относительного перемещения сопряженных деталей и нагрузки P на узел трения. Давление в зоне трения и скорость относительного движения сопряженных деталей определяют быстроту и степень частичной деформации или полного разрушения структурного каркаса смазки. Тем самым сочетание нагрузки P и скорости V определяет агрегативное состояние и характеристики течения содержащего остаточные элементы каркаса слоя частично деформированной ПС в зазоре между сопряженными деталями. Причем чем меньше величины P и V, тем более значительными будут отличия реодинамического течения пластичной системы от гидродинамического режима течения смазочного масла в аналогичных условиях. Максимальная работоспособность ПС достигается при таком сочетании параметров P и V, когда скорость поступления смазочного материала в зону трения будет превышать скорость его триборазложения.

Продолжительность работы ПС в парах трения скольжения определяется, в первую очередь, их вязкостью и структурно-механическими характеристиками, обусловленными природой дисперсной фазы и силой взаимодействия между этой фазой и дисперсионной средой [1].

Следует иметь в виду, что скорости скольжения в сопряжениях типа "вал–втулка", применяемых в системах управления, подвески и тому подобных устройствах, недостаточны для создания постоянного гидродинами-

ческого слоя, но они больше, чем в парах "плоскость–плоскость".

Максимальная работоспособность ПС достигается при оптимальном сочетании параметров *P* и *V*, когда скорость поступления смазочного материала в зону трения будет превышать скорость его триборазложения. Эффективность ПС при различных сочетаниях нагрузки и скорости целесообразно указывать раздельно в виде допустимых предельных значений каждого параметра, наглядно отражающих преимущественное назначение смазки.

Продолжительность работы ПС в подшипниках скольжения плоскость–плоскость и вал–втулка, кроме смазочной способности дисперсионной среды, определяется, в первую очередь, вязкостью и структурно-механическими свойствами, обусловленными природой дисперсной фазы и силой взаимодействия между жидкостью и загустителем [1].

Скорости скольжения в подшипниках вал–втулка, применяемых в системах управления, подвески и т.п., недостаточны для создания постоянного гидродинамического слоя, но они больше, чем в парах плоскость–плоскость. При качательном режиме работы подшипника вал–втулка течение пластичной смазки в зазоре подчиняется реодинамической теории течения вязко-пластичных систем, предложенной в 60-х годах прошлого века Н.В. Тябиным с сотрудниками. Согласно реодинамической теории, при качательном движении вала во время работы подшипника в зазоре между валом и втулкой на поверхности трения наряду с зоной, в которой создается гидродинамический слой смазки, в зазоре образуется зона смешанной (несовершенной) смазки, в которой на пятнах фактического контакта реализуется режим граничной смазки [2].

Как при гидродинамическом, так и при смешанном режимах смазки течение и формирование смазочного слоя обусловлены скоростью относительного движения сопряженных деталей и давления в зоне трения. На толщину смазочного слоя и его эффективность в режиме несовершенной (граничной) смазки оказывают влияние состав и свойства ПС. Температура смазочного слоя отражает эффективность пластичной смазки в этом режиме. Работоспособность пластичной смазки в сопряжении вал–втулка при качательном движении определяется как результат ее смазочного действия именно на участке, где реализуется граничное трение.

Изучение динамики формирования смазочного слоя товарными и модельными смазками проводили в паре трения вал–втулка с качательным движением. Рабочий узел представлял собой вал диаметром 60 мм, вращающийся в бронзовой втулке диаметром отверстия 61 мм и длиной 60 мм, при удельном давлении 0,2 МПа и скорости скольжения 0,45 м/с. Частота колебаний вала составляла 2 Гц, одно качание совершалось за 0,54 с, угол качания ±30°. Толщину слоя смазки *h* (мкм), путь трения, на котором реализуется несовершенная смазка *S* (мкм), а также температуру смазочного слоя измеряли с помощью емкостных датчиков и трех электродов на первой секунде работы, а также после 30 и 60 с работы узла.

С увеличением времени работы подшипника первоначальная толщина слоя смазки, снижаясь, стремится к определенной величине (рис. 1). По мере уменьшения толщины слоя смазки (но раньше, чем достигается его минимальная толщина) возникает непосредственный контакт микровыступов сопряженных поверхностей.

Результаты испытаний ПС различного состава позволяют сделать заключение, что в процессе формирования смазывающего слоя можно выделить три периода:

- I – распределение смазочного материала по поверхности трения и постепенное убывание толщины слоя;

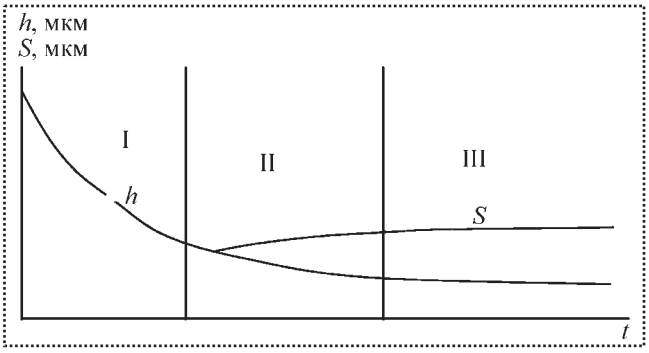


Рис. 1. Изменение толщины смазочного слоя *h* и пути трения при несовершенной смазке *S* в зависимости от времени работы; I–III – периоды формирования смазывающего слоя

• II – дальнейшее убывание толщины смазочного слоя, возникновение и рост пути трения при несовершенной смазке;

• III – формирование установившегося постоянного режима трения и смазки с установившейся толщиной смазочного слоя и его температуры, а также величиной пути трения при несовершенной смазке.

Распределение смазки на первом этапе определяется количеством заправленной порции, ее составом и объемно-механическими свойствами.

Во втором периоде формирование установившегося смазочного слоя является функцией свойств смазки и условий работы узла трения.

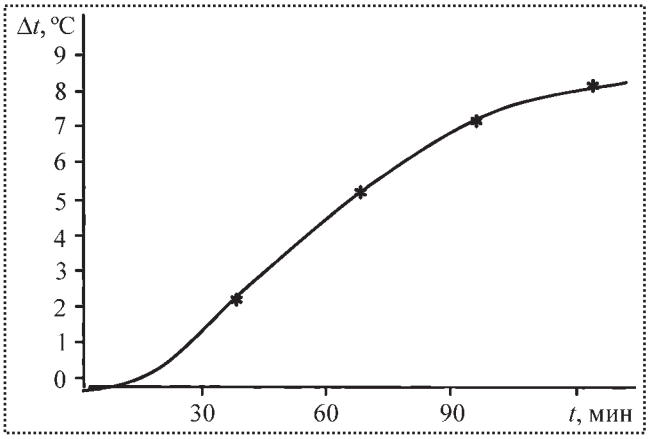


Рис. 2. Повышение температуры слоя смазки ВНИИ НП 260 при качательном движении вала

Установившаяся в третьем периоде величина "пути трения при несовершенной смазке", толщина смазочного слоя и его температура определяются составом смазки. Эти "установившиеся" характеристики смазочного слоя постепенно изменяются в сторону убывания по мере срабатывания ПС.

Одновременно с формированием смазочного слоя в зоне трения повышается температура (рис. 2). Для всех испытанных смазок характер изменения температуры смазочного слоя подобен приведенному на рисунке (натриевая смазка на основе минерального масла). На степень разогрева смазочного слоя оказывают влияние состав, эффективная вязкость и предел прочности ПС. Так, при использовании смазок с пределом прочности 140...250 Па смазочный слой разогревается до 8...13,5 °С; при применении смазок с пределом прочности 250...600 Па разогрев увеличивается до 15,5...19,0 °С. (Дисперсионная среда испытанных смазок одна и та же.) В случае использования смазок с пределом прочности более 250 Па по мере увеличения продолжительности испытаний возрастала доля пути трения при несовершенной смазке.

Изменение эффективной вязкости смазки путем добавления вязкостной присадки "октол" от 1 до 4 Па·с при градиенте скорости $D = 100$ с$^{-1}$ практически не оказывает заметного влияния на толщину смазочного слоя (рис. 3). В то же время при выбранной нами скорости скольжения с увеличением вязкости дисперсионной среды несколько уменьшается величина пути трения с "несовершенной смазкой" (рис. 4).

Величина предела прочности (140...500 Па) сказывается только на начальной стадии распределения ПС по поверхности трения: чем больше предел прочности, тем в момент запуска больше "путь трения при несовершенной смазке" (табл. 1). При испытаниях смазок, изготовленных на одной и той же дисперсионной среде, но с различным пределом прочности, значение пути трения при "несо-

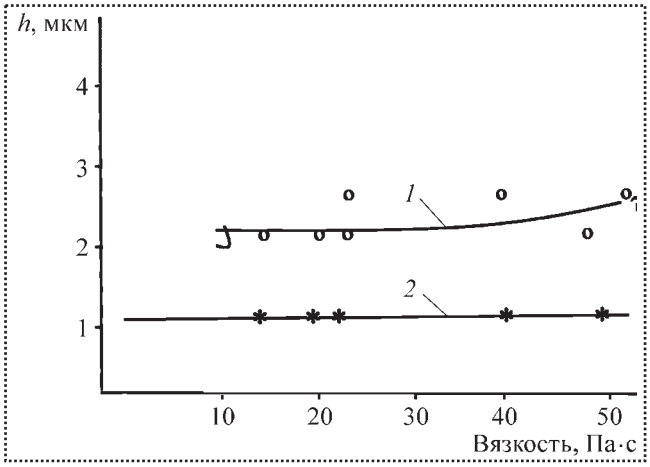


Рис. 3. Влияние эффективной вязкости смазки на толщину *h* смазочного слоя при качательном движении вала:
1 – в момент запуска; *2* – через 60 с после запуска

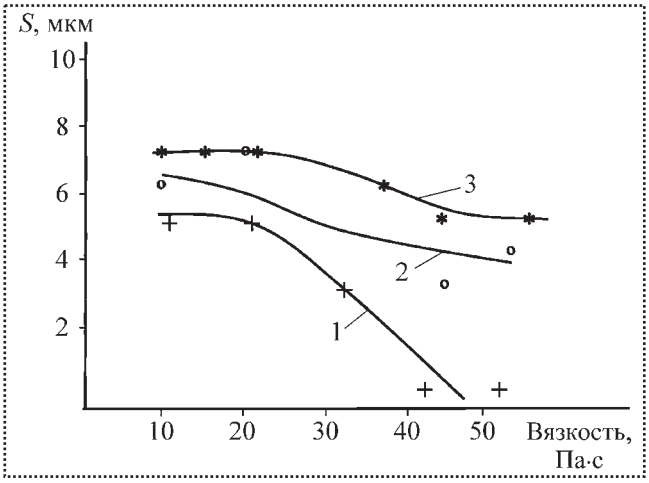


Рис. 4. Изменение пути трения с несовершенной смазкой при увеличении эффективной вязкости ПС:
1 – в момент запуска; *2* – через 30 с; *3* – через 60 с

вершенной смазке" приближается к одинаковой величине.

На величину и время установления пути трения при "несовершенной смазке" существенное влияние оказывает природа дисперсионной среды ПС, имеющих предел прочности 90...190 Па (см. табл. 1). ПС на основе эфира 2 при меньшей вязкости дисперсионной среды обеспечивает создание смазочного слоя такой же толщины, как и смазка на основе значительно более вязкой кремнийорганической жидкости ПЭС-С-2. Добавление эфира 2 к углеводородной жидкости 3/30 приводит к резкому увеличению пути трения при "несовершенной смазке".

В зависимости от сочетания компонентов в паре жидкость–загуститель изменяются величина и динамика формирования смазочного слоя и пути трения с "несовершенной смазкой" (рис. 5).

Результатами испытаний ПС в паре трения вал–втулка был подтвержден вывод, полученный ранее на паре трения плоскость–плоскость: в подшипниках скольжения эффективны смазки с малым пределом прочности. Высокий предел прочности ускоряет возникновение режима несовершенной смазки. Толщину смазочного слоя и величину пути несовершенной смазки можно регулировать изменением состава и свойств ПС [1].

В составе современных смазочных материалов (масел и пластиче-

1. Âëèÿí èå ï ðèðî äû äèñåðñèî í í î é ñðåäû í à ðî ëù èí ó ñì àçî ÷í î ãî ñëî ÿ *h* è âåëè÷èí ó ï óòè òðåí èÿ ï ðè í åñî âåðø åí í î é ñì àçêå *S* êàëüöèåâû õ êî ì ï ëåêñí ûõ ñì àçî ê*

Жидкость	Кинематическая вязкость при 100 °С, мм²/с	Характеристика смазочного слоя			
		30 с		60 с	
		h, мкм	*S*, мкм	*h*, мкм	*S*, мкм
Октол 600	–	20	6	20	6
Углеводородное масло 3/30	8,4	4	0	4	2
Масло 3/30 + эфир	6,5	3	12	3	15
Эфир №2	5,0	6	30	6	30
Полиэтилсилоксан ПЭС- С- 2	37,0		18		18

*Предел прочности смазок 90...190 Па.

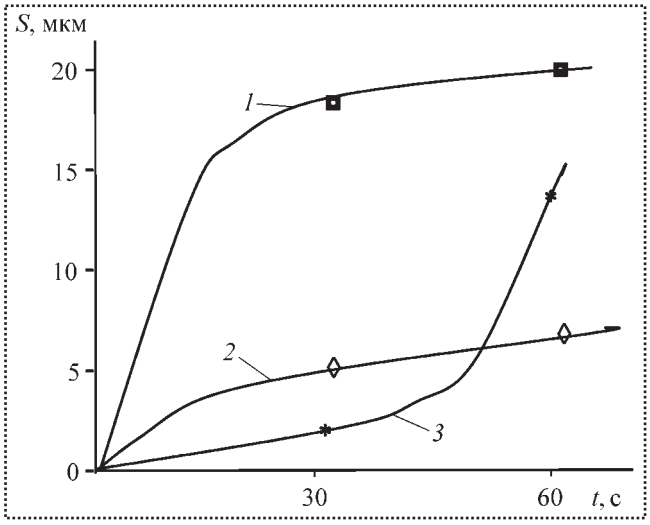


Рис. 5. Влияние природы дисперсионной среды и сочетания жидкость–загуститель на формирование пути трения с несовершенной смазкой:
1 – кальциевая комплексная смазка на основе полиэтилсилоксановой жидкости А; *2* – литиевая смазка на основе сложного эфира; *3* – кальциевая комплексная смазка на основе полиэтилсилоксановой жидкости Б

ских смазок) широко применяются синтетические углеводородные масла, сложные эфиры, другие жидкости. Кроме вязкости, на формирование и характеристики смазочного слоя оказывают влияние также стехиометрическое строение молекул жидкости, наличие и расположение в них активных радикалов [3–4]. Важную роль в формировании смазочного слоя ПС играют дисперсная фаза и функциональные наполнители [5–6].

При малой скорости относительного движения сопряженных деталей формирование смазочного слоя с элементами более или менее разрушенной пластичной структуры, по-видимому, должно иметь много общего как при гидродинамическом, так и при смешанном режиме смазки, как в подшипнике скольжения, так и в подшипнике качения. Чем больше скорость движения, тем, по-видимому, будет меньше влияние свойств структурного каркаса пластичной системы на формирование смазочного слоя.

Некоторые исследователи считают, что при высоких скоростях относительного движения трущихся деталей структура пластичной системы полностью разрушается и загуститель не влияет на формирование и движение смазочного слоя. В этой связи сравнительную оценку влияния жидкостей различной природы и ПС различного состава на толщину смазочного слоя и диапазон скоростей, при которых этот слой существует, проводили в условиях чистого качения. При однонаправленном движении сопряженных поверхностей трения было установлено, что наряду с вязкостью жидкости толщина смазочного слоя и допустимая скорость движения деталей до возникновения "масляного голодания" зависят также от молекулярного строения углеводородов (табл. 2 и 3).

Полученные результаты качественно перекликаются с выводами, сделанными в работе [3] при испытаниях сложных эфиров различного строения. Так, при увеличении вязкости изопарафиновых масел № 1 и 2 в 8,3 раза толщина слоя возрастает в три раза, но предельно допустимая скорость качения при этом снижается в 2,5 раза. Для масел ароматического строения № 4 и 6, при практически таком же увеличении вязкости масел (в 6,3 раза) толщина смазочного слоя увеличивается только в 1,5 раза, но предельно допустимая скорость качения изменяется в шесть раз.

В случае применения сложных эфиров на формирование, характеристики и границы существования упругогидродинамического смазочного слоя влияют расположение эфирных групп, молекулярная масса и вязкость жидкости (см. табл. 3).

При увеличении вязкости эфира ПДГК ДОС-2 в два раза по отношению к вязкости эфира ПДГК ДОС-1, толщина смазочного слоя возрастает только на 40 %, тогда как допустимая скорость качения снижается почти в два раза. При практически одинаковой вязкости эфиров 9, 11, 14 в зависимости от

строения молекулы эфира допустимая скорость качения изменяется более чем в два раза.

Состав дисперсной фазы также оказывает влияние на формирование, толщину и границы существования сплошного смазочного слоя. В тех же условиях, что и дисперсионные среды, были испытаны пластичные литиевые, кальциевые, натриевые и алюминиевые комплексные смазки, изготовленные на изопарафиновом масле № 10, эфирах № 12 и 14.

Мыльные загустители оказывают влияние на значительное увеличение толщины смазочного слоя по сравнению с исходной дисперсионной средой. Это влияние сохраняется до скорости движения сопряженных деталей более 21 м/с.

Необходимо отметить, что при использовании одинаковой дисперсионной среды разные мыла способствуют различному увеличению толщины смазочного слоя по сравнению с исходной жидкостью. Во всех испытанных смазках основой дисперсной фазы являются соли органических кислот, лишь незначительно различающиеся молекулярной массой.

3. Âëèÿí èåì î ëåêóëÿðí î ãî ñòðî åí èÿ ñëî æí ûõ ýô èðî â í à òî ëù èí ó ñì àçî ÷í î ãî ñëî ÿ è äî ïóñòè- ì óþ ñêî ðî ñòü, ï ðè êî òî ðî é ýòî ò ñëî é ñî õðàí ÿåòñÿ

№	Жидкость	Кинематическая вязкость при 100 °С, мм^2/с	Максимальная скорость качения V_{max}, м/с	Толщина слоя, h, мкм при V_{max}
9	ПДГК ДОС-1	11,9	7,3	0,24
10	ПДГК ДОС-2	23,4	4,3	0,29
11	ПАК	12,6	10,6	0,12
12	ПАС	16,9	3,8	0,18
13	ПТ МП	5,0	21,0	0,09
14	НС-2-ЭГ	9,9	18,0	0,09

*Опыт проведен при контактном давлении P = 1,0 ГПа и температуре 50 °С.

По-видимому, изменение толщины смазочного слоя обусловлено не длиной органической части молекулы мыла, но особенностями структурного каркаса и агрегативной устойчивостью системы жидкость—загусти-

2. Âëèÿí èåì î ëåêóëÿðí î ãî ñòðî åí èÿ äèñï åðñèî í í ûõ ñðåä (óãëåâî äî ðî äí ûõ æèäêî ñòåé) í à òî ëù èí ó ñì àçî ÷í î ãî ñëî ÿ è äî ïóñòèì óþ ñêî ðî ñòü, ï ðè êî òî ðî é ýòî ò ñëî é ñî õðàí ÿåòñÿ

№	Жидкость	Кинематическая вязкость, мм^2/с		Максимальная скорость качения V_{max}, м/с	Толщина слоя, h, мкм, при V_{max}
		50 °С	100 °С		
1	Изопарафиновое, с боковыми цепями различной длины	9,4	3,3	>20	0,1
2	Поли-α-олефиновое, с боковыми цепями одинаковой длины	42,2	93	23,0	0,45
3	Высоковязкое поли-α-олефиновое № 2, фр.>500°	181,6	27,6	9,5	0,84
4	Алкилнафталиновое	–	30,0	3,5	0,5
5	Высоковязкое алкилнафталиновое, № 4; фр.>500°	329,9	39,7	3,5	0,52
6	Алкилбензольное	21,4	5,4	22,0	0,32
7	Минеральное масло МС-14	94,9	14,6	7,5	0,60
8	Минеральное масло МС-20	149,2	19,9	4,8	0,32

Примечание. При достижении максимального значения толщины слоя, характерного для данной жидкости, возникает процесс масляного голодания.

4. Âëèÿí èå äèñïåðñí î é ô àçû í à òî ëù èí ó ñì àçî ÷í î ãî ñëî ÿ è äî ï óñòèì óþ ñêî ðî ñòü, ï ðè êî òî ðî é ýòî ò ñëî é ñî õðàí ÿåòñÿ

Дисперсная фаза	Дисперсионная среда	Максимальная скорость качения V_{max}, м/с	Толщина h слоя, мкм, при V_{max}
–	М-9с	23,0	0,45
StLi,	М-9с	11,5	0,58
(St+Ac)Ca25,%	М-9с	7,5	0,55
(St+Be)Al13%	М-9с	7,0	0,39
(St+12oSt)Li+церезин,10%	М-9с	6,8	0,25
(St+12oSt)Li+тефлон,3%	М-9с	5,5	0,49
(St+12oSt)Li11%Pb,Sn2,5%	М-9с	7,5	0,334
–	А6475	22,0	0,32
StLi,15%	А6475	–	0,45
(St+12oSt)Li12%	А6475	12,5	0,29
(St+12oSt)Li10%+церез,16%	А6475	9,0	0,24

тель, зависящей от катиона соли органической кислоты.

При примерно одинаковой эффективной вязкости ПС, кроме толщины смазочного слоя, изменяется также величина допустимой скорости движения, при которой этот слой сохраняется, как это видно из табл. 4. Различное влияние загустителей на характеристики смазочного слоя свидетельствуют о частичном сохранении структуры пластичной смазки в зоне контакта сопряженных деталей. Это предположение подтверждают также результаты испытаний литиевых смазок с различными добавками. Даже добавление в состав пластичной смазки наполнителей, не образующих структурный каркас, в количестве (по объему), равноценном количеству загустителя, практически не оказывает влияния на изменение толщины слоя, но в некоторых случаях способствует даже уменьшению и толщины смазочного слоя, и предельной скорости движения деталей, при которой этот слой сохраняется (см. табл. 4).

В подшипниках скольжения сочетание высокого давления в зоне трения с большей скоростью перемещения и частой сменой направления движения сопряженных деталей оказывается наиболее трудными условиями для равномерного обеспечения пластичной смазкой всей поверхности трения и быстрого восстановления смазочного слоя после каждой смены направления движения.

Оценку влияния величины предела прочности смазки и состава дисперсной фазы на образование и границы существования смазочного слоя ПС в подобных условиях проводили в высоконагруженном подшипнике вал–втулка, имитирующем одно из сочленений стойки шасси и условия трения в этом узле при взлете-посадке самолета-перехватчика. Скорость скольжения ступенчато изменяли от 3,2 до 9,8 см/с (60 кач/мин), давление в зоне трения варьировалось от 30 до 120 МПа [7]. Испытания прекращали при возрастании коэффициента трения до значения 0,2.

Были испытаны литиевые модельные смазки с пределом прочности от 26 до 260 Па, изготовленные на основе синтетического изопарафинового масла. В режиме качательного движения в сопряжении вал–втулка смазки с пределом прочности 50...90 Па обеспечивают эффективную работу при более широком со-

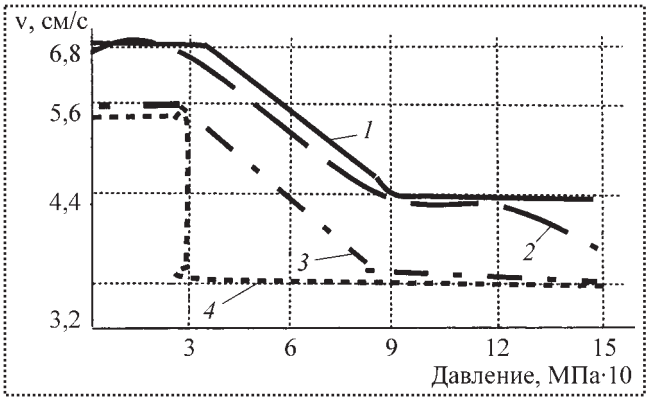


Рис 6. Влияние величины предела прочности (при 50 °С) на работоспособность литиевых смазок (масло ИПМ-10): *1* – предел прочности 20 Па; *2* – предел прочности 40 Па; *3* – предел прочности 90 Па; *4* – предел прочности 260 Па

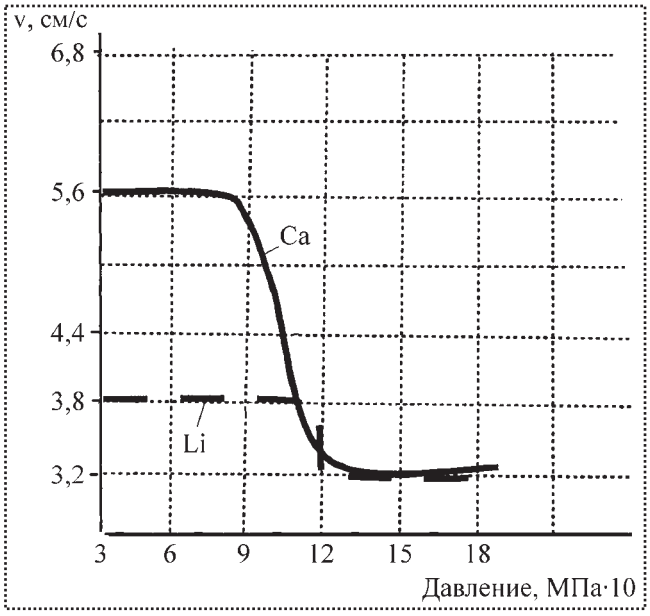


Рис. 7. Влияние дисперсной фазы смазки (масло ИПМ-10) на эффективность смазочного слоя: Li – литиевая смазка; Ca – кальциевая комплексная смазка

четании давления и скорости скольжения (рис. 9, кривые *1* и *2*). С увеличением предела прочности (и, следовательно, содержания дисперсной фазы) эффективность ПС ухудшается: уменьшается диапазон допустимой скорости скольжения и давления в зоне контакта. Сжимаются границы варьирования возможных сочетаний этих условий (см. рис. 9, кривые *3* и *4*).

Состав дисперсной фазы смазки оказывает влияние на сочетание допустимых давления в зоне трения и скорости скольжения сопряженных деталей.

Так при замене кальциевого комплексного мыльного загустителя на литиевое мыло стеариновой и 12-оксистеариновой кислот (предел прочности обеих смазок одинаков), как следует из рассмотрения кривых на рис. 10 , приводит к значительному изменению диапазона допустимых скорости скольжения деталей и нагрузки на пару вал–втулка.

Выводы

При применении смазочного масла (жидкости) толщина смазочного слоя в подшипнике и диапазон скоростей, в котором эта толщина сохраняется, определяется вязкостью и молекулярным строением смазочной жидкости.

Толщина смазочного слоя, образуемого пластичной смазкой в подшипнике касательного движения, режим его формирования, диапазон допустимых скоростей зависит от природы дисперсионной среды, состава дисперсной фазы и эффективности пары жидкость–загуститель.

Дисперсная фаза оказывает влияние на процесс формирования и толщину смазочного слоя, образуемого ПС и в зоне трения скольжения, и в зоне трения качения.

В режиме граничного трения ПС с мыльными загустителями предпочтительнее смазок с немыльными загустителями.

По степени влияния на формирование смазочного слоя большей толщины с более высокой несущей способностью кальциевое комплексное мыло имеет преимущество перед литиевыми мылами.

Библиографический список

1. **Крахмалёв С.И.** Влияние состава и свойств пластичных смазок на их эффективность в зоне трения пары плоскость–плоскость при возвратно-поступательном движе-

нии // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2009. № 7.

2. **Трение, износ и смазка** (трибология и триботехника) / под общ. ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.

3. **Крахмалёв С.И., Таранова Н.В., Моисейкина Н.Н. и др.** Зависимость антифрикционных свойств от природы смазочного материала и условий в узле трения // Пластичные смазки. Сб.трудов ВНИИ НП, вып. 46, М.: ЦНИТЭНЕФТЕХИМ, 1985. С. 33–45.

4. **Snyder F.L., Tevaarwerk J.L., Schey J.A.** Исследование влияния присадок к моторным маслам на толщину масляной пленки и коэффициент трения // SAE Techn. Pap. Ser., 1984. № 840263. 12 p.

5. **Бакашвили Д.Л., Чхеидзе Г.Р., Шварцман В.Ш. и др.** Толщина смазочной пленки вязкопластичных жидкостей // "Трение, износ и смазочные материалы". Труды Междунар. конф.. Ташкент, 22–26 мая, 1985, тезисы, т. 3, ч. 1, Ташкент, 1985. С. 144–151.

6. **Кагеяма Х., Маклудори У., Мариучи Т.** Применение пластичной смазки в эластогидродинамических контактах // NLGL Spokesman, 1984. V. 48. № 3. P. 72–80.

7. **Дякин С.И., Филатова Т.П., Титов В.В.** Исследования конструкционных и смазочных материалов на трение и изнашивание в тяжелонагруженных шарнирах // Долговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение, 1988. Вып. 3. С. 144–157.

Контактные координаты автора:

Крахмалёв Станислав Иванович – e-mail: ksi05@list.ru.

СПРАВОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ

Материалы на основе полинафтоиленбензимидазолов

В качестве связующих для антифрикционных композиций, работающих в жестком режиме при высоких температурах, рекомендуется использовать полинафтоиленбензимидазол (ПНБИ), для которого характерны высокие температуры размягчения и разложения на воздухе и в вакууме. ПНБИ перерабатывают методом горячего прессования с образованием прочных и твердых материалов. Известна композиция "Терман" на его основе, обладающая хорошей смазочной способностью и высокой износостойкостью при температурах 200...500 °С. Полимерная композиция ПНБИ, в состав которой в качестве антифрикционного компонента могут входить графит, MoS_2 и металлические порошки, обладает высокими триботехническими свойствами при температуре свыше 350 °С.

Как правило, термообработку получаемых заготовок проводят при температуре 450...500 °С, когда возможно частичное протекание процессов термодеструкции, приводящих к ухудшению свойств композиций. Поэтому к ПНБИ добавляют термореактивные фенолформальдегидные олигомеры типа СФ-490 и СФ-342А, образующие при нагревании полимерные сетки, благодаря чему температура переработки материала "Терман" снижается с 470...500 °С до 180...220 °С. При этом оптимальным является соотношение СФ: ПНБИ = 60 : 40 (мас. доля).

Ôèçèêî -ì åõàí è÷åñêèå ñâî éñòâà ðàçëè÷í û õ í àï î ëí åí í û õ àí òèô ðèêöèî í í û õ êî ì ï î çèöèé í à î ñí î âå Ï Í ÁÈ

Содержание компонентов, % (мас. доля)				ρ, г/см^3	$\sigma_{сж}$, МПа	КС, кДж/м^2	НВ
СФ-490	ПНБИ	графита	MoS_2				
100	–	–	–	1,284	–	1,0	250
80	20			1,312		1,9	270
60	40			1,350	70	2,9–3,5	300
40	60			1,369	–	1,9	280
	–	60		1,7225		1,0	
		–	60	2,2905		1,0–1,5	300
24	16	60	–	1,7803	60...80	2,0–2,5	270
		–	60	2,3168	110		330
		50	10	1,8747	50	2,5	
20	80	–	–	1,383	–	–	140
–	100			1,4073		70	150*

*Под нагрузкой 150 Н, в остальных случаях – 250 Н.

УДК 621.01: 621.891

М.М. Хрущов, *д-р техн. наук (Институт машиноведения им. А.А. Благонравова АН СССР)*

Повышение износостойкости сталей путем поверхностных упрочнений за счет термических, химико-термических обработок, нанесения покрытий и наплавок*

Данная публикация основана на материалах записки "Износостойкие упрочнения сталей", составленной проф. М.М. Хрущовым (1890–1972) в 1971 г. при разработке научно-технического прогноза по проблеме "Повышение сроков службы и коэффициента полезного действия машин за счет снижения износа и уменьшения потерь на трение". Записка отражает состояние трибологической науки того периода (1960-е – 1970-е годы), когда работы в области разработки новых прогрессивных технологий поверхностного упрочнения и повышения триботехнических свойств поверхностей трения еще не получили достаточного развития. Записка отражает также взгляды М.М. Хрущова на проблемы триботехнического материаловедения, связанные с разработкой новых износостойких материалов, и представляет в наше время не только исторический интерес.

Publication is based on materials of a Memorandum prepared in 1971 by Prof. M.M. Khruschov (1890–1972). The Memorandum entitled "Increasing life and efficiency of machines by decreasing wear and energy losses for friction" is devoted to scientific and technological perspectives in this field and represents the state of knowledge of sixties and seventies of the 20th century when the development of new progressive technologies of friction surface strengthening has been to a large extent a matter of future. The content of Memorandum also demonstrates the viewpoint of its author on the problems of tribologic materials science and the perspectives of new wear-resistant materials for friction parts development being actual since now.

Ключевые слова: триботехническое материаловедение, поверхность трения, износ, трение, термическая обработка (ТО), химико-термическая обработка (ХТО), покрытие, наплавка.

Key words: tribologic materials science, friction surface, wear, friction, heat treatment, chemical heat treatment, coating, building-up.

УПРОЧНЕНИЯ СТАЛИ НА ОСНОВЕ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Процесс ионного азотирования состоит в нагреве обрабатываемой стальной детали путем ионной бомбардировки активным газом в условиях тлеющего разряда, в контейнере, при давлении около 10 мм рт. ст., причем обрабатываемая деталь является катодом. Весь цикл обработки сокращается в 10 раз. Процесс получил широкое распространение за рубежом, однако внедрение его у нас требует организации производства специального оборудования. В СССР работы по этому методу активно проводятся в МАДИ [4].

Процесс высокотемпературного азотирования состоит в сочетании азотирования при высокой температуре с последующей закалкой. Условия обработки подбираются так, чтобы обеспечить после закалки высокие сжимающие напряжения в упрочненном слое, что значительно повышает износостойкость. Процесс получил распространение в США, Англии и Японии и известен под названиями "нитрозакалка" или "марстресинг". Долговечность подшипников качения, детали которых обработаны этим методом, повышается в два–три раза. Для применения метода у нас необходимо его предварительное исследование в наших условиях.

Нитроцементация в газовой среде. Процесс называют также карбонитрированием. Он отличен от цементации в том отношении, что проводится в атмосфере, обеспечивающей одновременную диффузию и углерода, и азота при температурах, более низких, чем применяемые при цементации (780...850 °С). После нитроцементации производится закалка.

*Начало см. "Трение и смазка в машиностроении и механизмах" № 5. 2010.

Качество и износостойкость закаленного слоя детали зависят, при равных условиях испытания, от его химического состава, структуры и твердости, которые могут меняться в широких пределах в связи со свойствами основного металла и режимом процесса.

Процесс нитроцементации в газовой среде получил применение в массовом производстве благодаря созданию оборудования для нитроцементации и закалки, могущего быть размещенным в поточные линии, и применению автоматического управления нагревом и содержанием углерода в контролируемой газовой атмосфере. В СССР нитроцементация широко применяется в автомобильном и тракторном машиностроении.

Значительное ускорение процесса может быть достигнуто при применении индукционного нагрева стали ТВЧ и повышении температуры нагрева до 930...940 °С. Эти возможности, однако, практически еще не реализованы.

Вариантом процесса нитроцементации является процесс низкотемпературной нитроцементации (580...600 °С). При этом нагрев осуществляется в неядовитых газовых средах, процесс продолжается 6...10 ч. При такой температуре процесс более приближается к азотированию, так как поверхностный слой в большей мере обогащается азотом, чем углеродом. Полученный слой обладает высокой износостойкостью и повышает контактную усталостную прочность деталей.

Цианирование. Цианирование является термодиффузионным процессом, при котором тонкий поверхностный слой детали обогащается углеродом и азотом в результате длительного нагрева в расплавленных цианосодержащих слоях. Температура нагрева, в зависимости от требуемой глубины упрочненного слоя и состава ванны, может быть 900...950 °С – при глубоком цианировании. При цианировании конструкционных сталей применяется более низкая температура, 820...870 °С. После цианирования производится закалка. Свойства упрочненного поверхностного слоя аналогичны свойствам, получаемым после нитроцементации: высокая твердость, износостойкость, сопротивление схватыванию.

Этот процесс разработан давно и получил широкое распространение. Его недостатками являются ядовитость применяемых для ванны солей и прерывистость операций.

Вариантом процесса цианирования является процесс низкотемпературного цианирования, получивший широкое применение за рубежом, где он известен под разными названиями и в различных модификациях ("мягкое нитрирование", "активированное нитрирование", "жидкостное нитрирование"). Процесс ведется в соляных ваннах, содержащих цианид / цианат калия и карбонаты щелочных металлов (температура нагрева – 510...570 °С, длительность выдержки – 1...3 ч). Ускорение цианирования может быть достигнуто продувкой сквозь соляную ванну воздуха, ускоряющего диссоциацию цианистых солей; для уменьшения загрязнения ванны железом применяют титановые сосуды.

Известны различные разновидности процесса. Так, при сульфоцианировании в соляную ванну добавляют содержащие серу соединения. В этом случае при нагреве (540...600 °С) происходит обогащение поверхностного слоя стали не только азотом и углеродом, но и серой. Наличие серы повышает сопротивление схватыванию при трении и фреттинг-коррозии.

У нас низкотемпературное цианирование еще не получило широкого распространения. Между тем выгоды его применения и его эффективность в деле повышения износостойкости деталей несомненна, что подтверждается применением процесса во многих его вариантах во всех промышленных странах. Процесс используется не только для деталей, работающих с трением, но также для режущего инструмента.

В работе [4] отмечается, что для освоения в СССР процесса низкотемпературного цианирования необходимо:

• осуществить в промышленных масштабах выпуск отечественных аналогов химически чистых цианистых солей в виде гранул;

• провести разносторонние исследования по влиянию фазового состава карбонитридного слоя на износостойкость цианированных сталей и определить возможности использования нового процесса при различных условиях трения;

• изучить усталостную, контактную прочность и деформации реальных промышленных деталей после цианирования;

• провести стендовые и эксплуатационные испытания деталей, упрочненных низкотемпературным цианированием;

• разработать образцы и осуществить выпуск оборудования для проведения низкотемпературного цианирования.

Термодиффузионное хромирование. Процесс термодиффузионного хромирования стали хорошо исследован и получил в СССР применение для повышения коррозионной стойкости изделий из железных сплавов, повышения износостойкости деталей машин и некоторых инструментов. Известен ряд методов термодиффузионного хромирования, получивших распространение за рубежом (газовые неконтактные методы): альфатайзинг-процесс (США); сельфатайз-процесс (Япония); хлороводородный процесс (Бельгия, ГДР).

Малоуглеродистые стали и железо в виде заготовок, подвергнутые термодиффузионному хромированию на значительную глубину, могут прокатываться и обрабатываться пластическим деформированием, в результате чего получают листы, трубы и другие изделия с антикоррозионным поверхностным слоем, обогащенным хромом. При термодиффузионном хромировании стали, содержащей среднее или высокое количество углерода, в поверхностном слое образуются карбиды хрома, обладающие высокой твердостью (1600...1800 кгс/мм^2), что обеспечивает высокое сопротивление изнашиванию.

Наиболее распространенным методом хромирования деталей, принятым в нашей стране, является метод хромирования в ящиках в среде порошка, окружающего обрабатываемые объекты. Процесс ведется при 1000...1100 °С и выдержке 6...12 ч. На высокоуглеродистой стали при этом образуется карбидный слой глубиной 10...15 мкм. Применением индукционного нагрева ТВЧ длительность нагрева может быть уменьшена до 10...15 мин (вместо часов) [5]. Это направление развития метода представляется перспективным.

В СССР было разработано хромирование в вакууме заготовок малоуглеродистой стали, позволяющее получать глубину слоя 1,5...8 мм у заготовок, предназначаемых для последующего проката.

Авторами [5] были приведены соображения о направлениях дальнейшего развития технологии и использования хромирования в стране, согласно которым целесообразно развивать применение хромирования и насыщения хромом в комплексе с другими элементами для повышения свойств жаропрочных сплавов на основе никеля, молибдена, ниобия, вольфрама и титана, поскольку исследования показали значительное увеличение жаростойкости и эрозионной стойкости этой группы сплавов.

Дальнейшее развитие диффузионного хромирования должно идти по пути упрощения технологии производства (использование хлор-водородного способа, применение солей хрома в готовом виде), интенсификации процесса и перевода его на автоматические линии. Большие перспективы для интенсификации процесса хромирования имеет применение нагрева ТВЧ, позволяющего резко сократить продолжительность процесса.

Термодиффузионное комплексное легирование. Метод комплексного термодиффузионного легирования был разработан в НИИ тех-

нологии машиностроения (Ростов). Метод основан на высокотемпературной обработке (950...1150 °С) стальных деталей в порошковом сплаве, содержащем хром, железо, углерод и небольшие добавки никеля, марганца и кремния. В результате такой обработки на поверхности стальных изделий образуется покрытие, состоящее в основном из износостойких карбидных фаз типа $(Cr,Fe,Si)_{23}C_6$; $(Cr,Fe,Si)_7C_3$ и частично легированного феррита. Высокая износостойкость, достаточные прочностные свойства при хорошем сцеплении с основным металлом, а также значительная антикоррозионная стойкость слоя позволяют использовать этот метод для упрочнения как режущих деталей, так и деталей трения, работающих в агрессивных средах. Применение метода возможно при упрочнении поверхности деталей, изготовленных из высокоуглеродистой стали. Процесс обычно ведется при температуре 1000 °С, и выдержка в зависимости от выбранной толщины слоя составляет 4...12 ч. Упрочненный слой имеет толщину 20...30 мкм. Для обеспечения достаточной прочности подложки детали после упрочнения подвергают закалке и отпуску по стандартной технологии.

Технология комплексного термодиффузионного легирования на поточно-механизированной линии (в условиях массового производства) внедрена на Актюбинском заводе "Актюбсельмаш" для упрочнения режущих пар стригальных машинок, внедряется на Симферопольском заводе "Сельхоздеталь" для упрочнения элементов сенокосилок. В условиях крупносерийного производства технология внедрена на Ростовском машиностроительном заводе для упрочнения режущих пар стригальных машинок и на Симферопольском заводе "Сельхоздеталь" для упрочнения сегментов измельчителя, внедряется на Харьковском тракторном заводе и Ногинском заводе топливной аппаратуры для упрочнения деталей топливных насосов.

УПРОЧНЕНИЯ СТАЛИ МЕТОДОМ НАПЛАВКИ

Применение наплавок. Способ наплавки износостойкого сплава на трущуюся рабочую поверхность стальной детали является весьма распространенным и эффективным. Он может быть подразделен на ряд вариантов технологического процесса, различающихся: по способу нагрева наплавляемого сплава, по степени возможной механизации операций, по способу введения легирующих элементов в сплав, по составу и свойствам наплавляемого металла, по назначению. Покрытие путем наплавки может применяться как при изготовлении новых деталей, так и при восстановлении изношенных поверхностей в условиях ремонта.

Покрытие путем наплавки создает биметаллическую деталь, в которой распределение материала может быть наиболее рациональным в соответствии с условиями службы отдельных участков детали. Некоторые наплавки, содержащие карбиды металлов, по твердости своих структурных компонентов превосходят наиболее твердые горные породы (кварциты, граниты, руды), что объясняет их высокую износостойкость. Ряд наплавочных материалов служит для упрочнения деталей, работающих в металлургическом производстве в условиях высоких температур.

Экономическая эффективность применения износостойких наплавок проявляется:

○ для новых деталей – в повышении их сроков службы до первого ремонта;

○ для деталей, восстанавливаемых при ремонте – в продлении сроков службы до следующего ремонта по сравнению с обычным восстановлением размеров путем наплавки тем же материалом, из которого сделана деталь.

В том и другом случае достигается огромная экономия на стоимости расходуемых запчастей.

В сравнительном масштабе применение износостойких наплавок у нас и в США

можно видеть из сопоставления общего расхода специальных наплавочных материалов в 1962 г. – в США было продано около 30 тыс. т., тогда как в СССР намечался выпуск 3,5 тыс. т. [6].

Получение наплавленного слоя методом напыления с последующим оплавлением. Одним из вариантов технологического процесса наплавки твердого покрытия на деталь слоем толщиной 0,2...0,3 мм является сочетание напыления наносимого материала в виде порошка на упрочняемую поверхность и последующее оплавление этого слоя. Оплавление производится специальной горелкой, в которой подаваемый газ разогревается вольтовой дугой и увлекает порошок наплавляемого металла, который плавится и наносится на поверхность детали. Последующее оплавление производится кислородно-ацетиленовым пламенем другой горелки или при индивидуальном нагреве ТВЧ.

Существенными сторонами технологического процесса являются: введение в наплавляемый материал добавок бора и кремния, вследствие чего материал при расплавлении оказывается "самофлюсующимся"; применение наплавляемого материала в форме сферических мелких гранул (40...150 мкм в поперечнике). Авторы [7] приводят примеры достигаемого повышения износостойкости при использовании последнего из описанных методов к деталям углесосов и гидроприводов – износостойкость в условиях промышленной эксплуатации повысилась у деталей с наплавленным защитным слоем в три–пять раз, сравнительно с деталями без наплавленного слоя.

Индукционная наплавка. Вариантом вышеописанного метода является "индукционная наплавка" твердых сплавов, разработанная Ростовским НИИ технологии машиностроения (данные о процессе приведены по сообщению директора института – В.Н. Ткачева). Сущность метода заключается в расплавлении присадочного материала на основном металле, разогреваемом ТВЧ. В качестве присадочного материала используется специальная порошкообразная шихта, состоящая из гранулированного твердого сплава и флюсов на основе боросодержащих соединений.

Основными преимуществами, обусловившими широкое распространение индукционной наплавки в различных отраслях машиностроения, являются возможность широкого варьирования свойств наплавленного металла и нанесение его на поверхность тонким равномерным слоем (до 0,3 мм), а также относительная простота технологической схемы упрочнения.

Химический состав твердого сплава выбирается в зависимости от требований, предъявляемых к наплавленному металлу. В настоящее время для наплавки используются следующие основные группы сплавов:

- легированный чугун Ц30Х28Н4С4 (сормайт), У45Х35Г3З2С (ФВХ-6-2), У50Х40Н2С2Г (УС-25) и др.;
- псевдосплавы (ПС-3, ПС-4, ПС-5), представляющие собой композитный материал, состоящий из тугоплавких износостойких включений, сцементированных более легкоплавкой связкой.

В качестве тугоплавкой износостойкой составляющей используется углеродистый феррохром или карбиды вольфрама, в качестве связки – легированный чугун.

В настоящее время метод внедрен на более чем 25 предприятиях страны. Упрочнению подвергаются плужные лемеха, лапы культиваторов, ножи силосоуборочных машин, лопатки мельничных вентиляторов, решетки угольных транспортеров и т.д.

В отрасли сельскохозяйственного машиностроения 93 % всех наплавочных работ выполняются с помощью индукционной наплавки. Метод внедрен также на многих ремонтных предприятиях "Сельхозтехники". Общий экономический эффект за данное время превысил 175 млн руб.

Помимо дальнейшего расширения внедрения, следовало бы провести работы по направлениям, связанным, во-первых, с изучением особенностей изменения конфигурации наплавленного металла под действием высокочастотного поля ТВЧ и разработке на этой основе технологических схем нанесения наплавок на детали сложной формы, во-вторых, с более глубоким исследованием факторов, определяющих свойства наплавленного металла, и, в-третьих, с разработкой средств механизации и автоматизации наплавки.

УПРОЧНЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

Газотермическое напыление. Нанесение на поверхность детали металла или сплава методом металлизации известно давно, но получило лишь в последние годы заметное применение при восстановительном ремонте деталей машин. Ведущей организацией является ВНИИ АвтогенМаш, который ведет разработку проблемы как одной из основных своих задач. Процесс назван им "газотермическое напыление". Этот метод основан на нагреве материала покрытия до жидкого или пластического состояния и распылении его с помощью газовой струи.

Существующая в настоящее время аппаратура для газотермического напыления (газопламенная, электродуговая, плазменная и др.) позволяет наносить покрытия из самых различных по природе, составу и свойствам материалов – органических полимеров, металлов, твердых сплавов, керамики, металлоподобных соединений и др. Посредством газотермического напыления можно наносить покрытия из многих материалов, получение которых иными способами вообще невозможно. Способ отличается простотой и позволяет наносить покрытия на поверхность не только металлов, но и пластмасс, керамики, графита и иных материалов.

Газотермические покрытия применяются в весьма разнообразных целях: для защиты от коррозии, исправления дефектов литья, повышения жаростойкости (алитирование), восстановление геометрических размеров изношенных деталей машин, повышения эрозионной стойкости, нанесения электроизоляционных, термобарьерных и многих других видов покрытий. С целью повышения срока службы машин и снижения износа деталей газотермические покрытия имеют весьма широкие возможности промышленного применения, обсуждаемые ниже.

Восстановление размеров изношенных деталей. В этой области особенно эффективно применение металлизации распылением в ремонтных целях, так как с ее помощью простыми средствами можно восстанавливать размеры изношенных шеек валов, цапф, осей, плунжеров, поршней, шпинделей и т.п. деталей. При работе в условиях смазки напыленные покрытия отличаются низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью. Важное преимущество способа состоит в том, что при нанесении покрытия не происходит нагрева изделия и поэтому ни структура, ни прочностные свойства восстанавливаемой детали не изменяются. В зарубежной практике посредством металлизации восстанавливаются не только небольшие детали, но и такие ответственные, как, например, шейки прокатных станов, подступичных осей железнодорожных вагонов и многие другие.

Придание поверхности специальных свойств. Металлизационные покрытия применяют для одновременной защиты от действия агрессивной среды и механического износа. Для этого наносят покрытия из нержавеющей стали, никеля, бронзы, монель-металла, серебра и др. Так, например, шейки валов гидротурбин и насосов при изготовлении металлизируются нержавеющей сталью, что увеличивает срок их службы в 10 и более раз. Металлизация молибденом поверхности поршневых колец двигателей внутреннего сгорания и дизелей снижает коэффициент трения и в два–три раза увеличивает ресурс работы цилиндров. Эти же покрытия наносятся на направляю-

щие станин прецизионных металлообрабатывающих станков, особо ответственных и быстро изнашиваемых деталей автомобилей, например, кольца синхронизаторов коробки передач, и на многие другие детали, что существенно увеличивает срок службы трущихся пар.

Нанесение антифрикционных покрытий. Эта область применения металлизации является очень перспективной, так как дает возможность получить многокомпонентные антифрикционные псевдосплавы, образующиеся в момент нанесения покрытия. Путем применения при электродуговой металлизации электродной проволоки из разноименных металлов, либо при напылении смеси из различных порошков можно получить псевдосплавы с низким коэффициентом трения, высокой износостойкостью и значительной пористостью, улучшающей условия смазки.

Покрытия с высокими антифрикционными свойствами, равноценные лучшим сортам баббитов и специальных подшипниковых сплавов на медной основе, могут быть получены без применения дефицитных цветных металлов, что имеет важное технико-экономическое значение.

Наплавка напылением (см. также раздел, посвященный индукционной наплавке). Способ широко распространен в США и странах Западной Европы. Сочетает в себе два одновременно или порознь осуществляемых процесса – напыление покрытия и его оплавление. Получаемые покрытия практически беспористые и отличаются большой твердостью (до HRC = 60), износостойкостью и термостойкостью. Покрытия наносятся напылением порошков из специальных самофлюсующихся сплавов, содержащих бориды хрома на никелевой и кобальтовой основе.

Покрытия применяются для повышения износостойкости шеек валов, осей, рабочих поверхностей угольных шнеков, шприц-машин, плунжеров, штоков, калибров, траков, клапанов и др. изделий. Организованный в нашей стране промышленный выпуск порошков для наплавки напылением открывает широкие возможности для внедрения процесса.

Плазменное напыление. Этим методом можно наносить покрытия из наиболее тугоплавких металлов – вольфрама, молибдена, титана, ниобия и др., а также из тугоплавких окислов, интерметаллидов и т.п. соединений. С их помощью решаются задачи защиты деталей от действия высоких температур, эрозии, снижения теплопроводности, придания поверхности каталитических и барьерных свойств. Некоторые виды плазменных покрытий используются также для улучшения работы сопряженных трущихся пар. Примером являются керамические покрытия, наносимые на торцевые уплотнения. Благодаря высокой твердости керамических покрытий, например, окиси алюминия, и возможности приработки их поверхности до чистоты 12 класса, они отлично работают в паре с графитом и другими материалами в условиях высоких нагрузок, давлений и действия агрессивных жидкостей. Метод применяется в химическом машиностроении, атомной технике и др. отраслях. По-видимому, он имеет большие перспективы использования для упрочнения поверхностей трения деталей машин.

УПРОЧНЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Твердое хромирование. Твердое гальваническое хромирование известно давно и хорошо изучено. Его применение существенно повышает износостойкость деталей в определенных условиях их работы. По данным лабораторных испытаний при твердости 1000 кг/мм^2 гальванически осажденный хром обладает в 3,4 раза более высокой износостойкостью при трении о закрепленные зерна корунда, чем закаленная сталь 40, имеющая твердость 700 кг/мм^2.

Использование гальванического твердого хромирования в производстве сравнительно ограничено даже там, где доказана его боль-

шая эффективность в снижении износа. Можно думать, что причина этому в необходимости для реализации метода разрабатывать специальное оборудование, что в ряде случаев представляет самостоятельную задачу, более сложную, чем выявление эффективности самого метода.

Выход из строя поршней автотракторных двигателей обычно обуславливается износом по высоте верхней поршневой канавки [9]. Большой зазор в паре "кольцо – канавка" в сочетании с износом маслосъемных колец приводит к увеличению угара масла и выходу двигателя в ремонт. Р.В. Кугелем были проведены опыты повышения износостойкости автомобильных поршней путем хромирования плоских торцевых сторон поршневых колец. Было опробовано покрытие торцев верхних поршневых колец автомобильных двигателей слоем плотного хрома толщиной 0,02...0,03 мм. Эксплуатационные испытания двигателей показали, что при этом износ колец по высоте снизился в пять и более раз, износ канавок уменьшился в среднем вдвое, зазоры в канавках уменьшились в 2,5...3,5 раза по сравнению с зазором в тех канавках, где были установлены серийные поршневые кольца [9, 10]. Тем не менее, этот эффективный и недорогой метод повышения долговечности, разработанный в 1947–1950 гг., не был внедрен, что зависит, как известно, от технологических служб.

УПРОЧНЕНИЯ СТАЛИ В РЕЗУЛЬТАТЕ НАКЛЕПА

Износостойкость наклепанной стали. Вопрос об упрочнении стали путем наклепа для повышения ее износостойкости еще до конца не освещен. Ряд исследований абразивного изнашивания конструкционных углеродистых сталей, наклепанных путем пластического деформирования заготовки для образца или наклепанных путем обкатки роликом, указывает на то, что повышение твердости в результате наклепа не ведет к повышению износостойкости.

Опыты Ричардсона (подробно описанные нами в книге [11]) по местному наклепу особенно интенсивным методом разных сталей показали, что твердость некоторых легированных термообработанных сталей может доходить в наклепанном состоянии до 1200 кг/мм^2, т.е. до уровня твердости кварцевого песка. Можно думать, что износостойкость такой стали при абразивном изнашивании в контакте с кварцевыми частицами будет существенно выше, чем до наклепа, но соответствующих опытов проведено не было. В литературе приводились также данные о повышении износостойкости наклепанной стали в условиях безабразивного изнашивания при граничной смазке без указания причин или вида изнашивания. Исследования влияния наклепа на износостойкость в условиях, иных, чем при абразивном изнашивании, стоят на очереди.

УПРОЧНЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ ФОСФАТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Покрытие трущейся поверхности стальной детали фосфатом марганца обеспечивает лучшее удержание на поверхности сопряженных деталей смазки, уменьшает трение и устраняет схватывание. Метод применяют для избежания схватывания и заедания в период приработки, при местных высоких контактных давлениях, например, в зубчатых передачах. Фосфат марганца выполняет в этих случаях как бы функции твердой смазки. Покрытия наносятся из расчета приблизительно 100...400 мг/дм^2. Процесс нанесения фосфата марганца производится при погружении детали после очистки в ванну, содержащую водный раствор соли при температуре 90...98 °С с выдержкой порядка 10...20 мин, и последующей промывкой. Метод прост и эффективен, не требует сложного оборудования.

Выводы

Общим направлением износостойкого упрочнения стали для противодействия механическим видам изнашивания является повы-

шение механических свойств поверхностного слоя, его твердости и вязкости, путем термической и химико-термической обработки, применения твердых покрытий и твердых наплавок. Упрочнение стали против проявления схватывания достигается химико-термическими обработками, обогащающими поверхностный слой азотом или серой, применением неметаллических покрытий, окислением поверхностного слоя при трении и т.д. Понятия защиты от проявления изнашивания и упрочнения против изнашивания сходятся особенно близко при борьбе с изнашиванием в период приработки, когда применение пластичных покрытий, обладающих малой износостойкостью, способствует приработке без проявления схватывания и заедания, и тем самым повышает износостойкость сопряжения.

Одним из самых эффективных путей повышения износостойкости стальных деталей машин является упрочнение их поверхностных слоев методами термической и химико-термической обработки, применением облицовочных наплавок и металлических покрытий. Соответственные технологические процессы непрерывно совершенствуются, создаются новые методы или их варианты.

В отечественном машиностроении использование современных методов упрочнения развито весьма неравномерно: в более развитых отраслях массового машиностроения, таких как автостроение и тракторостроение, их использование более полно, в других отраслях имеет место отставание от использования современных методов упрочнения. Сильное отставание наблюдается в ремонтном деле, где вопросы применения современной технологии связаны с масштабом и системой организации работ. По ряду перспективных способов интенсификации технологий упрочнения необходимо провести технологические экспериментальные исследования с целью их дальнейшей проверки и определения условий применения.

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромынский пер., 4
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение".
Адрес электронной почты издательства: **E-mail: mashpubl@mashin.ru;** редакции журнала: **tsmm@mashin.ru; sborka@mashin.ru**; **www.mashin.ru**
Телефон редакции журнала: 8(499) 268-38-42; тел./факс 8(499) 268-85-26; факс: 8(499)269-48-97.
Дизайнер *Подживотов К.Ю.* Технический редактор *Андреева Т.И.* Корректоры *Сажина Л.И.*, *Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 08.04.10 г. Подписано в печать 07.06.10 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 5,37. Заказ 460. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство Машиностроение".
Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15.

Триботехнические свойства некоторых минералов в вакууме

В некоторых отраслях промышленности используют механические устройства с парами трения, в которых желательно применение различных драгоценных и полудрагоценных минералов, а также стекла или шпинеля.

В табл. 1–3 приведены триботехнические свойства различных минералов и минералополимерных пар трения. Лучшими антифрикционными характеристиками при трении скольжения в вакууме обладают пары ДАК-8 со стеклом и яшмой, при этом износ минеральных материалов практически отсутствует.

Наилучшими триботехническими характеристиками обладает пара из яшмы с ДАК-8, в которой за 8 ч работы отсутствует износ всех элементов узлов. Незначительный износ отмечается у стекла с ДАК-8, яшмы и ситалла с ФН-202. Пара трения из мрамора и ДАК-8 не работоспособна: шары и кольца разрушаются, сепаратор значительно изнашивается, f возрастает до 0,2. Пара с кольцами и шарами из габбро и сепаратором из ДАК-8 имеет ресурс 8 ч, но при этом наблюдается большой износ колец, шаров и сепаратора.

Таким образом, применение минералополимерных пар, в частности минералов яшмы, стекла, габбро и других минералов в паре с полимерным материалом ДАК-8, может оказаться эффективным средством обеспечения работоспособности узлов скольжения и качения в специальных механизмах.

1. Êî ýô ô èöèåí òû òðåí èÿ ì èí åðàëî â ï î ñòàëè í à âî çäóõå (òðåí èå áåç ñì àçî ÷í î ãî ì àòåðèàëà; êî í òàêòí àÿ ï àðà ï î ëóñô åðè÷åñêèé èí äåí òî ð – äèñê âðàù àòåëüí î ãî äâèæåí èÿ)

Нагрузка, Н	Пара трения		
	Рубин – сталь	Лейкосапфир – сталь	Шпинель – сталь
3	0,4	0,33	0,38
5	0,58	0,35	0,49
10	0,37	0,311	0,37
15	0,30	0,28	0,33
20	0,28	0,25	0,28
25	0,26	0,23	0,25
30	0,25	0,22	0,24

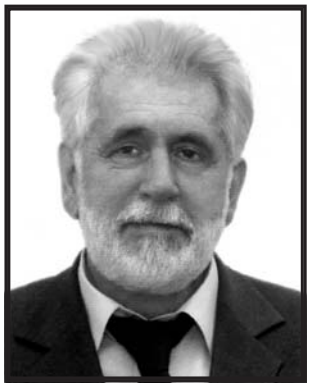
2. Òðèáî òåõí è÷åñêèå õàðàêòåðèñòèêè ì èí åðàëî - ï î ëèì åðí ûõ ï àð òðåí èÿ â âàêóóì å ($ð_ñ \approx 10^{-3}$ Ï à, N = 25 H, v = 0,5 ì /ñ, L = 1000 ì ; êî í òàêòí àÿ ï àðà ï î ëóñô åðè÷åñêèé èí äåí òî ð – äèñê âðàù àòåëüí î ãî äâèæåí èÿ)

Материал пары трения		$w_m \cdot 10^6$, кг		f
Индентор	Диск	Индентора	Диска	
Стекло	ДАК-8	Отсутствует	1,8	0,03–0,04
Яшма	ДАК-8	"	2,6	0,05
Стекло	ФН-202	0,2	37,4	0,05–0,12
Яшма	ФН-202	0,2	47,1	0,05–0,12

3. Òðèáî òåõí è÷åñêèå õàðàêòåðèñòèêè ì èí åðàëî ï î ëèì åðí ûõ ï àð êà÷åí èÿ â âàêóóì å ($p_c \approx 10^{-5}$ Ï à, n = 60 H, v = 0,08 ì /ñ)

Материал		$w_m \cdot 10^6$, кг				f
колец и шаров	сепаратора	подвижного кольца	неподвижного кольца	шаров	сепаратора	
Мрамор	ДАК-28	48,8	29,2	684,9	7,9	0,03–0,2
Габбро	ДАК-8	18,9	67,2	86,5	7,0	0,007–0,02
Яшма	ДАК-8	0,1	0,1	Отсутствует		0,003
Стекло	ДАК-8	0,7	–	0,1	2,9	0,003
Яшма	ФН-202	1,2	0,1	0,1	1,1	0,003–0,001
Ситалл	ФН-202	–	–	0,1	0,4	0,001

П р и м е ч а н и я: 1. Шары диаметром 10 мм размещались в сепараторе между двумя кольцами.
2. Дальность испытаний не превышала 8 ч.



ÔÓÊÑ
Èãî ðü Ãðèãî ðüåâè÷
(1937 – 2010 ãã)

15 ì àÿ 2010 ã ïîñëå ïðîäîëæèòåëüíîé òÿæåëîé áîëåçíè íà 73-ì ãîäó æèçíè ñêîí÷àëñÿ çàñëóæåííûé äåÿòåëü íàóêè ÐÔ, äîêòîð òåõíè÷åñêèõ íàóê, âûäàþùèéñÿ ñïåöèàëèñò â îáëàñòè ðåìè è è òåõíîëîãèè ñìàçî÷íûõ ìàòåðèàëîâ è õèìîòåðàïèè, âí¸ñøèé çíà÷èòåëüíûé âêëàä â ðàçâèòèå òðèáîëîãèè, ïîäøèïíèêîâ è ñèñòåì ñïåöèàë�íîãî íàçíà÷åíèÿ, äåéñòâèòåëüíûé ÷ëåí ÐÀÅÍ, ïðîôåññîð Èãî ðü Ãðèãî ðüåâè÷ Ôóêñ.

È.ÃÔóêñ ðîäèëñÿ 26 èþíÿ 1937 ã â Ëåíèíãðàäå â ñåìüå ïðîô. ÃÈ.Ôóêñà, îäíîãî èç âåäóù èõ ñïåöèàëèñòîâ â îáëàñòè êîëåí èäíîé õèì èè ìåò àëëóðãèè â, èçâåñòíîãî òàêæå ñâîèì è ðàáîòàì è î ãðàíè÷íîé ñì àçêå. Â 1959 ã Èãî ðü Ãðèãî ðüåâè÷ îêîí÷èë Ì îñêî âñêèé èíñòèòóò íåô òåõèì è÷åñêîé è ãàçî âîé ïðîì ûøëåííîñòè (íûíå ÐÃÓ íåô òè è ãàçà) èì. È.Ì.Ãóáêèíà ïî ñïåöèàëüíîñòè «Èíæåíåð-òåõíîëîã ïî ïåðåðàáîòêå íåô òè è ãàçà». Ñ ýòèì èíñòèòóòîì áûëà ñâÿçàíà âñÿ åãî ïîñëåäóþùàÿ òâîð÷åñêàÿ äåÿòåëüíîñòü êàê ó÷¸íîãî è ïääàãîãà. Â 1966 ã îí çàùèùàåò äîêòîðñêóþ, â 1980 ã– äîêòîðñêóþ äèññåðòàöèè. Ìíîãî ëåò îí çæèâåëÿë êâî åäðó õèì èè è òåõíîëîãèè ñì àçî÷íûõ ì àòåðèàëîâ è õèì îòëèãåè, áûë äåêàíîì ôàêóë�òåòà. Åãî âîñïèòàíèêè ðàáîòàþò òâîðñêè ì íîãõ íàó÷íûõ è ïðîèçâîäñòâåííûõ ïðåäïðèÿòèé Ðîññèè, áûâøèå è äàëüíåãî çàðóáåæüÿ, â êîòîðûõ íåéòðîñïèêèñòîâ êî ì ïàíèÿõ ÐÀÎ «Ãàçïðîì», «Ëóêîéë», «Ñëàâíåôò» è òä. Ì íîãåå èç íèõ ñòàëè ðóêîâîäèòåëÿìè è ðàáîòíèêàì è ðÿäà ðîññèéñêèõ Í Ï Ç è çàâîäîâ, âî çæèâàâèÿþò ïîäðàçäåëåíèÿ âåäóùèõ îòðàñëåâûõ è àêàäåì è÷åñêèõ èíñòèòóòîâ ïîðîèçâîäèòåëüíîñòè è äîêàçàâ è÷åñêèõ èíñòèòóòîâ ïîðîèçâîäèòåëüíîñòè è äðèì åíåíèþ íåô òåï äîêîâ.

Íàðÿäó ñ ïääàãîãè÷åñêîé È.ÃÔóêñ àêòèâíî çàíèìàëñÿ è íàó÷íîé äåÿòåëüíîñòüþ. Î ñíîâíûì è íàïðàâëåíèÿì è äåãî ñòàëè ðàçðàáîòêà è îïòèì èçàöèè ýêñïëóàòàöèîííûõ ñâîéñòâ è ïóòåé óêó÷øåíèÿ êà÷åñòâà ñì àçî÷íûõ ì àòåðèàëîâ, ýêñïëóàòàöèè äî áàâî êè äðçëè÷íîé ïðîäóêöèè äî áàâî êè äðçëè÷íîé ïðîäóêöèè ñìàçî÷íûõ ìàòåðèàëîâ è ïóòåé óêó÷øåíèÿ êà÷åñòâà ñì àçî÷íûõ ì àòåðèàëîâ, ýêñïëóàòàöèè äî áàâî êè äðçëè÷íîé äîáàâêè è äðóãèõ äîáàâîê è ñïåöèàë�íîãî íàçíà÷åíèÿ, äîáèâàÿñü ñíèæåíèÿ ñòîèìîñòè è ïîâûøåíèÿ íàäåæíîñòè è äîëãîâå÷íîñòè ñìàçî÷íûõ ìàòåðèàëîâ è äåòàëåé.

Ïîä ðóêîâîäñòâîì È.ÃÔóêñà ïîäîáíûé âîïðîñ áûë ðàçðàáîòàí, ïîñòàâëåí è ðåøåí ñïåöèàëèñòàìè è ñîçäàíû ýôôåêòèâíûå ìåòîäû ðàñ÷åòà è ïðîãíîçèðîâàíèÿ ðåñóðñà è äð. Èì è åãî ñîòðóäíèêàì è ñîçäàíû ýôôåêòèâíûå ìåòîäû ðàñ÷åòà è ïðîãíîçèðîâàíèÿ ñîïðîòèâëåíèÿ è ïîäøèïíèêîâ, ÷ðî îáåñïå÷èâàåò ïðàêòè÷åñêè áåçîòêàçíóþ ðàáîòó ïîäøèïíèêîâ ïðè ïîâûøåííûõ íàãðóçêàõ è ñêîðîñòÿõ ñêîë�çæåíèÿ.

Ðåçóëüòàòû èññëåäîâàíèé È.Ã Ôóêñà îïóáëèêîâàíû (èí äèâèäóàëüíî èëè â ñîâàòîðñòâå) â 500 íàó÷íûõ ðàáîòàõ, âêëþ÷àÿ 20 ñïðàâî÷íèêîâ, ìîíîãðàôèé è ó÷åáíûõ ïîñîáèé. Â ñâîèõ èññëåäîâàíèÿõ è ðàçðàáîòêàõ, à òàêæå â ïääàãîãè÷åñêîé äåÿòåëüíîñòè áîëüøîå âíèìàíèå óäåëÿë òðèáîëîãèè, èçíàøèâàíèå è ïðèìåíåíèå ñìàçî÷íûõ ìàòåðèàëîâ è äåòàëåé.

Ïîä ðóêîâîäñòâîì È.Ã Ôóêñà îïóáëèêîâàíû (èí äèâèäóàëüíî èëè â ñîâàòîðñòâå) â 500 íàó÷íûõ ðàáîòàõ, âêëþ÷àÿ 20 ñïðàâî÷íèêîâ, ìîíîãðàôèé è ó÷åáíûõ ïîñîáèé. Â ñâîèõ èññëåäîâàíèÿõ è ðàçðàáîòêàõ, à òàêæå â ïääàãîãè÷åñêîé äåÿòåëüíîñòè áîëüøîå âíèìàíèå óäåëÿë òðèáîëîãèè, èçíàøèâàíèå è ïðèìåíåíèå ñìàçî÷íûõ ìàòåðèàëîâ è äåòàëåé.

Ïîä ÷ëåíîì-êîððåñïîíäåíòîì ðàêåòíî-êîñìè÷åñêîé òåõíèêè è òåõíîëîãèè ÷ëåí-êîððåñïîíäåíò ÐÀÅÍ [Êàï èöû (1998 ã) è Âåðí àäñêèé ã (2000 ã)]; îí – ëàóðåàò ïðåì èè èì. È.Ê. Áàéàêîâà è èì. È.Ì.Ãóáêèíà, ïî÷¸òíûé ðàáîòíèêè ÒÝÊ ÐÔ, ïî÷¸òíûé ðàáîòíèêè âûñøåãî îáðàçîâàíèÿ ÐÔ, îòëè÷íèêè Ìèíîáðíàóêè ïðîìà, çàñëóæåííûé ðàáîòíèêè Ìèíîáðíàóêè ïðîìà è ïðîôåññèîíàëüíîãî îáðàçîâàíèÿ.

Ðåäàêöèîííûé ñîâåò è ðåäàêöèÿ æóðíàëà «Òðåíèå è ñìàçêà â ìàøèíàõ è ìåõàíèçìàõ» âûðàæàþò èñêðåííèå ñîáîëåçíîâàíèå ñåì�å è áëèçêèì ïî ïîêîéíîìó. Ñâåòëàÿ ïàìÿò� î íåì íàâñåãäà ñîõðàíèòñÿ â íàøèõ ñåðäöàõ.