

Изда
с 1960

ТРЕНИЕ И СМАЗКА В МАШИНАХ И МЕХАНИЗМАХ

9
сентябрь
2012

Выходит по инициативе и при содействии Российского национального комитета по трибологии, при поддержке Ассоциации инженеров-трибологов России (АИТ), Международного Союза научных и инженерных объединений (МСНМО), 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

Редакционный совет:

МОСКВА	САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
В.В. БАРДУШКИН	Л.И. ПОГОДАЕВ
И.А. БУЯНОВСКИЙ	СТАВРОПОЛЬ
Д.Н. ГАРКУНОВ	Н.С. ПЕНКИН
В.В. ГРИБ	ТВЕРЬ
С.М. ЗАХАРОВ	Н.Б. ДЕМКИН
В.Я. КЕРШЕНБАУМ	ТОМСК
А.Т. РОМАНОВА	В.Е. ПАНИН
БРЯНСК	А.В. КОЛУБАЕВ
О.А. ГОРЛЕНКО	УФА
Е.А. ПАМФИЛОВ	В.Ю. ШОЛОМ
КАЛИНИНГРАД	ХАБАРОВСК
С.В. ФЕДОРОВ	А.Ю. КОНЬКОВ
КЕМЕРОВО	БЕЛАРУСЬ
А.Н. КОРОТКОВ	Н.К. МЫШКИН
НАЛЬЧИК	МОЛДОВА
М.А. МАМХЕГОВ	В. ГОЛОГАН
НОВОЧЕРКАССК	УКРАИНА
Д.В. МИНЬКОВ	С.А. КЛИМЕНКО
РОСТОВ-НА-ДОНУ	И.А. ЛЮБИНИН
И.М. ЕЛМАНОВ	В.В. ШЕВЕЛЯ
А.С. КУЖАРОВ	ГЕРМАНИЯ
А.А. РЫЖКИН	Г. ФЛЯЙШЕР
РЫБИНСК	А. ЖЕРВЕ
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ	Г. ТЕППЕР
САМАРА	ПОЛЬША
Д.Г. ГРОМАКОВСКИЙ	Я. СЕНАТОРСКИЙ
	М. ЩЕРЕК
	С. ПЫТКО

Редакция:

И.М. ГЛИКМАН,

Е.Д. МАКАРЕНКО, Ю.А. ЧИЧОВ

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

ФИЗИКА, ХИМИЯ И МЕХАНИКА ПОВЕРХНОСТЕЙ И КОНТАКТНЫЕ ЗАДАЧИ

- Любимов Д.Н., Долгополов К.Н., Вершинин Н.К.** Релятивистские механизмы доплеровских сдвигов при трении 3
- Погодаев Л.И., Ежов Ю.Е.** Некоторые закономерности эрозии наплавков 8

МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Попов В.Л.** Метод редукции размерности для быстрого численного моделирования контактных свойств и силы трения между шероховатыми поверхностями 14
- Болотов А.Н., Горлов И.В., Щербаков Е.А.** Экспериментальное моделирование коррозионных процессов на смазанной маслом поверхности трения 23

ТРИБОЛОГИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Васильев Ю.Н.** Трение твердых смазочных материалов 28
- Фадин В.В., Алеутдинова М.И.** Роль графита в структуре металлических композитов при их изнашивании в условиях скользящего токосъема 34

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

- Измайлов В.В., Новоселова М.В., Гусев Д.А.** Адгезионное взаимодействие металлов в условиях трения покоя на микромасштабном уровне 40

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: 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.



THE MONTHLY SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL JOURNAL

FRICITION & LUBRICATION IN MACHINES AND MECHANISMS

September
2012

Published
from June

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 advisory board

Academician of RAS and REA
V.I. KOLESNIKOV

Vice-President

Academician of IEA
Yu.M. LUZHNOV

Editorial advisory board:

MOSCOW

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

BRYANSK

O.A. GORLENKO
E.A. PAMFILOV

KALININGRAD

S.V. FEDOROV

KEMEROVO

A.N. KOROTKOV

NALCHIK

M.A. MAMHEGOV

NOVOCHERKASSK

D.V. MINKOV

ROSTOV-ON-DON

I.M. ELMANOV
A.S. KUZHAROV
A.A. RYZHKIN

NOVOCHERKASSK

D.V. MINKOV

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

KHABAROVSK

A.YU. KONKOV

BELARUS'

N.K. MYSHKIN

MOLDOVA

V. GALOGAN

UKRAIN

S.A. KLIMENKO
I.A. LUBININ
V.V. SHEVELYA

GERMANY

G. FLEISCHER
A. GERVEY
G. TEPPER

POLAND

JA. SENATORSKY
M. SCHEREC
S. PYTKO

Editors:

I.M. GLIKMAN,
E.D. MAKARENKO, YU.A. CHICHOV

The journal is registered by RF Ministry of Press,
Tele-and Broadcasting and Mass Communications
Media.

Registration certificate ПИ № ФС 77-21137,
May 19, 2005 Free price.

CONTENTS

Physics, chemistry and mechanics of surfaces and contact problems

- Lubimov D.N., Dolgoplov K.N., Vershinin N.K.** Relativistic mechanisms of Doppler shift at friction 3
- Pogodaev L.I., Ezhov Yu.E.** Certain erosion welds' regularities 8

Modelliny

- Popov V.L.** Method of a reduction of dimension for fast numerical modeling of contact properties and force of a friction between rough surfaces 14
- Bolotov A.N., Gorlov I.V., Shcherbakov E.A.** Experimental modelling of corrosion processes on the oiled surface of the friction 23

Tribological materials technology

- Vasiliiyev Yu.N.** Friction of solid lubricants 28
- Fadin V.V., Aleutdinova M.I.** Graphite role in metal composite structure at its wear under conditions of sliding current collection 34

Pilot research of the triboiological processes

- Izmailov V.V., Novoselova M.V., Gusev D.A.** Adhesive interaction of metals in static friction contact on microscale level 40

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: 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.

ФИЗИКА, ХИМИЯ И МЕХАНИКА ПОВЕРХНОСТЕЙ И КОНТАКТНЫЕ ЗАДАЧИ

УДК 621.891

Д.Н. Любимов, К.Н. Долгополов, канд-ты техн. наук (Инжиниринговый центр "ЛИК", г. Шахты, Ростовская обл.), Н.К. Вершинин (Шахтинский институт (филиал) Южно-Российского государственного технического университета (Новочеркасский политехнический институт))

Релятивистские механизмы доплеровских сдвигов при трении

Приведен теоретический анализ возможного механизма, объясняющего экспериментально обнаруженное проявление при трении эффекта Доплера, основанного на зарегистрированном смещении длины световой волны источника монохроматического излучения в красную и фиолетовую области спектра. Направление спектрального смещения данного электромагнитного излучения зависит от напряженности и направления действия (полярности) внешнего электрического и магнитного полей. Действие магнитного поля вызывает фиолетовое смещение. Исходя из принципа эквивалентности массы и энергии, эффекты, наблюдаемые при трении, интерпретированы как формирование в микрообъемах трещинного пространства коллапсаров микронных размеров, благодаря которым убывает энтропия трибосистемы. По результатам расчета, проведенного на основании представленной полупирической модели развития трибосистем, найдены приблизительные значения радиуса коллапсара и его массы.

Deals with the theoretical analysis of the possible mechanisms explaining experimentally revealed phenomenon of Doppler shift at friction based on the registered displacement of light wave length of the source of monochromatic radiation to red and violet regions of spectrum. The direction of spectral displacement of the given electromagnetic radiation depends on the quantity of intensity and direction of action (polarity) of external electrical and magnetic fields. Magnetic field action causes violet displacement. With using the principle of equivalence of mass and energy the effects observed at friction are interpreted as collapses of micron sieges in microvolumes of frictional space due to which decreasing of entropy of tribosystem takes place. According to the calculation made on the ground of the given semiempirical model of tribosystems development approximate meanings of the collapse radius and its mass are found.

Ключевые слова: трибосистема, эффект Доплера, общая теория относительности, электромагнитное поле, фиолетовое смещение, черная дыра.

Keywords: tribosystem, Doppler effect, general theory of relativity, electromagnetic field, violet displacement, black hole.

В работах [1–5] авторами была обоснована возможность проявления действия законов релятивистской физики при трении в контакте поверхностей твердого тела.

Наиболее интересным следствием влияния этих закономерностей стало замедление локального времени в области трещинного контакта, о котором, по данным работы [5], можно судить по доплеровскому сдвигу длины волны электромагнитного излучения, проходящего сквозь трещинный контакт.

Изначально эффект Доплера был открыт в акустике и состоит в изменении длины волны звуковых колебаний в зависимости от направления движения источника по отношению к наблюдателю. При их сближении наблюдается смещение, свидетельствующее об уменьшении длины волны, а при удалении – смещение, обусловленное увеличением длины волны звуковых колебаний.

Эффект Доплера справедлив и для электромагнитных волн, к которым относится свет. Общая теория относительности объясняет эффект Доплера различным поведением мирового и собственного (локального) времени физической системы. Это различие вызвано тем, что величина промежутков собственного времени тем больше, чем дальше удалены точки пространства от источников силового поля [7].

Общая теория относительности (ОТО) объединяет временное измерение с пространственными координатами в единый пространственно-временной континуум. Вещество и энергия,



наполняющие пространство, искривляют его, в результате чего оно перестает быть плоским.

Однако нельзя "оторвать" искривленное пространство от течения времени в нем. Как отметил выдающийся английский физик С. Хокинг: "Получается, что и время имеет форму" [8].

Собственное время физической системы течет тем медленнее, чем меньше потенциал Φ_d силового поля (в ОТО – гравитационного поля) в данной точке пространства. Так как для гравитационного поля Φ_d имеет отрицательный знак, то эффект замедления времени усиливается при увеличении абсолютного значения потенциала:

$$\tau = \frac{r}{c} \left(1 - \frac{\Phi_d}{c^2} \right), \quad (1)$$

где τ – локальное время;

r – координата;

Φ_d – гравитационный потенциал;

c – скорость света.

Основатель теории относительности А. Эйнштейн указал на эффект Доплера, как на возможный факт подтверждения правоты положений ОТО. В середине XX в. был экспериментально зафиксирован длинноволновый доплеровский сдвиг при движении луча света вверх. В соответствии с положениями общей теории относительности подобный сдвиг может быть рассчитан по формуле

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} = g \frac{h}{c^2}, \quad (2)$$

где λ_0 – начальная длина световой волны;

$\Delta \lambda$ – доплеровский сдвиг;

g – ускорение свободного падения;

h – высота измерения.

Измеренный доплеровский сдвиг в поле тяготения Земли на высоте 10 м составил 10^{-15} м, что до 1 % совпало с теоретическими оценками. Доплеровский сдвиг, фиксируемый при трении, имеет многократно больший порядок (10^{-4}), что позволяет регистрировать его визуально (рис. 1). Последнее может быть объяснено толь-

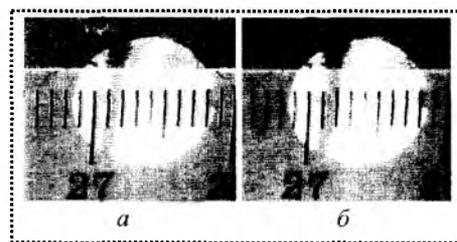


Рис. 1. Доплеровское смещение лазерного луча при трении фторопласта-4 по стали 45, проходящего сквозь область фрикционного взаимодействия:

a – до трения; b – при трении

ко существенно большим значением потенциала Φ_d из соотношения (1) для пространства, формируемого в поле фрикционной энергии по сравнению с гравитационным потенциалом, создаваемым полем тяготения Земли.

В экспериментах по выявлению проявления эффекта Доплера при трении обнаруживается смещение светового пятна, отображающееся на регистрирующем экране при прохождении "зеленого" лазерного луча сквозь фрикционный контакт, вправо, что в выбранной системе отсчета, тарированной по красному лазеру, соответствует "красному" смещению.

В физических системах, рассматриваемых общей теорией относительности, пространственно-временной континуум искажается под действием массы материальных тел. По принципу эквивалентности массы и энергии, доказанному Эйнштейном, энергия в чистом виде может искажать пространство и время, являясь таким образом альтернативным массе источником гравитации.

Гравитация по своей сути не является "протосилой", она сама – материя, само пространство-время, действие со стороны которой "не способен избежать даже свет". Следовательно, большее доплеровское смещение, вызванное трением, связано с большей энергетической плотностью, деформирующей пространственно-временной континуум области трения.

Сопоставим в соответствии с известным соотношением $E = mc^2$ совокупности энергетических полей, генерируемых в области фрикционного взаимодействия, некоторую эффективную массу $m_{эф}$, обуславливающую наблюдаемый доплеровский сдвиг. Этой массе можно приписать



некоторый потенциал $\varphi_{\text{эфф}}$, что в соответствии с уравнением Пуассона записывается как

$$\frac{\partial^2 \varphi_{\text{эфф}}}{d x^2} = \frac{1}{\varepsilon_0} \rho_q, \quad (3)$$

где ε_0 – электрическая постоянная;
 ρ_q – плотность заряда.
 По определению

$$\rho_q = \frac{Q}{V} = \frac{Ne}{V} = n_q e, \quad (4)$$

где Q – суммарный заряд участка фрикционно-контакта объемом V ;

N – число зарядов;

e – заряд электрона;

n_q – концентрация зарядов.

По своей форме соотношение (4) описывает электронный газ Зоммерфельда, средняя плотность зарядов которого составляет $10^{20} \dots 10^{22} \text{ м}^{-3}$

[9]. Тогда $\frac{\partial^2 \varphi_{\text{эфф}}}{d x^2} \approx 10^{12} \text{ В/м}^2$. Гравитацион-

ный потенциал из соотношения (1) записывается в форме, предложенной Эйнштейном:

$$\frac{\partial^2 \varphi_{\text{д}}}{d x^2} = 4\pi G M, \quad (5)$$

где G – гравитационная постоянная;

M – гравитационная масса.

Заменим гравитационную массу M на эффективную $m_{\text{эфф}}$ и приравняем левые части уравнений (3) и (5) с учетом соотношения (4):

$$\frac{\partial^2 \varphi_{\text{эфф}}}{d x^2} = \varepsilon_0^{-1} n_q e = 4\pi G m_{\text{эфф}}. \quad (6)$$

Получается, что эффективная масса представляет собой условную физическую величину, позволяющую оценить параметры материального тела, способного создать вокруг себя поле с напряженностью 10^{12} В/м . Предварительный расчет дает порядок массы $m_{\text{эфф}}$, равный 10^{21} кг , что всего в 10^4 раз меньше массы Земли.

Для оценки влияния $m_{\text{эфф}}$ на геометрию пространственно-временного континуума рассчи-

таем гравитационный радиус $R_{\text{д}}$ наблюдаемого нами объема фрикционной системы. Гравитационный радиус является одним из важнейших понятий общей теории относительности. Под ним понимается поверхность, на которой замыкаются мировые линии пространственно-временного континуума и где, с точки зрения внешнего наблюдателя, время останавливается, а тело с массой $m_{\text{эфф}}$ превращается в черную дыру [8]. Величина $R_{\text{д}}$ рассчитывается по формуле

$$R_{\text{д}} = \frac{2m_{\text{эфф}}}{c^2}. \quad (7)$$

Подставляя в формулу (7) расчетные значения $m_{\text{эфф}}$ и мировых постоянных G и c находим порядок значений гравитационного радиуса в 1 мкм, что довольно много по масштабам микро- и даже мезомира. Возможность существования небольших черных дыр – теоретически обоснованный факт в современной теории гравитации, а появление подобных объектов внутри физической системы оказывает существенное возмущающее действие на топологию пространственно-временного континуума, что может служить объяснением столь большого доплеровского сдвига, зафиксированного в результате трения.

Косвенным подтверждением подобных рассуждений является изменение доплеровского смещения при дополнительном активационном энергетическом воздействии на узел трения внешних электрических и магнитных полей, которое может рассматриваться как "прибавка" к величине $m_{\text{эфф}}$.

Трение генерирует собственные электромагнитные поля. Взаимодействие собственного и внешнего электромагнитных полей узла трения, с учетом принципа суперпозиции может либо усилиться, либо ослабиться – эта возможность заложена в форме записи соотношения (1). Последнее соответствует увеличению (уменьшению) величины $m_{\text{эфф}}$ и соответственно отражается на доплеровском сдвиге.

Например, при приложении к полимерному телу трения положительного потенциала в 12 В,

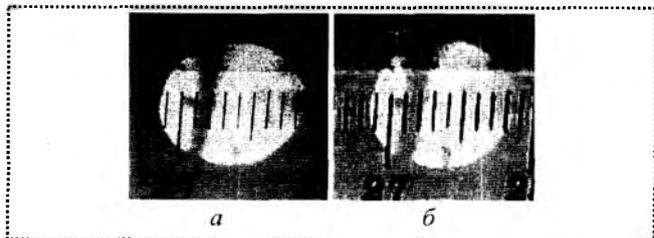


Рис. 2. Воздействие внешнего электрического поля на величину доплеровского смещения:

а – положительный потенциал на теле трения ("красное" смещение выражено); *б* – отрицательный потенциал на теле трения ("красное" смещение не явное)

красное смещение имеет значение 0,8 нм, при изменении полярности с сохранением абсолютного значения потенциала и прочих условий эксперимента величина доплеровского смещения падает более чем в десять раз, достигая значения 0,07 нм (рис. 2).

Интересно влияние на доплеровское смещение внешнего магнитного поля. В отличие от электрического поля силовые линии магнитного поля замкнуты, и, как показано в работе [1], они оказываются как бы "вморожены" в вещество релаксирующей трибоплазмы, возникающей при трении. При этом каждая силовая линия магнитного поля перемещается вместе с отдельными частицами трибоплазмы. Это воздействие оказывает результирующее влияние на отдельные частицы трибоплазмы и создает пондеромоторные силы, магнитное поле приводит в движение мезо- и макрообъемы вещества трения.

Силы Лоренца, в зависимости от направления вектора напряженности магнитного поля, становятся либо центростремительными, собирая вещество трибоплазмы в сгусток, либо центробежными, разрыхляющими (дезориентирующими) плазмойды.

При "сдавливании" трибоплазмы силами магнитного поля геометрические размеры плазмойдов начинают уменьшаться условно от сферы Ферми, приближаясь к гравитационному радиусу R_g .

В соответствии с основными положениями ОТО происходит замедление собственного времени системы по сравнению с мировым временем наблюдателя. Вблизи горизонта событий мировые линии замыкаются, образуя петли Ге-

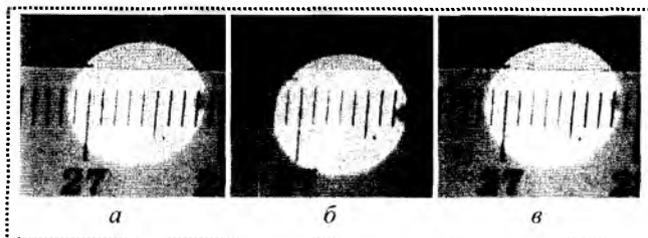


Рис. 3. Расположение световых пятен на мерной шкале:

а – до трения; *б* – "фиолетовое смещение" преломленного лазерного луча под воздействием магнитного поля при трении; *в* – исчезновение эффекта "фиолетового" смещения при обратном направлении магнитного поля

деля. Собственное время останавливается [2, 10].

Столь существенные изменения, происходящие в метрике пространственно-временного континуума, влияют на доплеровский сдвиг. С. Хокинг пишет по этому поводу: «...мы получаем возможность исследовать механизм причинностной структуры, разработанной Роджером Пенроузом и мной для изучения сингулярности и черных дыр. Даже без привлечения уравнений Эйнштейна я могу доказать, что горизонт событий конечного происхождения будет содержать замкнутый световой луч, снова и снова возвращающийся в одну и ту же точку. Напоминает *deja vu*. Кроме того, всякий раз, когда луч описывает окружность, он все больше смещается к фиолетовой части спектра, изображение постепенно становится синим...» [10].

Таким образом, возможность формирования внутри плазмойда микроколлпаса вызывает необычный феномен "фиолетового" доплеровского сдвига. Такое смещение лазерного луча в коротковолновую область спектра действительно было зафиксировано (рис. 3, *а* и *б*). Изменение же направления магнитного поля не только устраняет "фиолетовое смещение", но и нивелирует доплеровский сдвиг – $\Delta\lambda < 0,01$ нм (рис. 3, *в*).

Полученные результаты являются косвенным свидетельством (несмотря на все попытки ученых, сегодня свидетельства существования черных дыр даже в масштабах Космоса все косвенные) того, что плотность энергии внутри трибоплазменных объемов может достигать критических значений, достаточных для "свертывания" пространственно-временного континуума в гравитационный коллапс.

