ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ТРЕНИЕ И СМАЗКА В МАШИНАХ И МЕХАНИЗМАХ

Издается с июля 2005 г.

12 декабрь 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

Редакционный совет:

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

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
И.А. ЛЮБИНИН
В.В. ШЕВЕЛЯ

ГЕРМАНИЯ
Г. ФЛЯЙШЕР
А. ЖЕРВЕ
Г. ТЕППЕР

ПОЛЬША
Я. СЕНАТОРСКИЙ
М. ЩЕРЕК
С. ПЫТКО

Редакция:
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

Фёдоров С.В. Расчет истинного объема трения 3

ФИЗИКА, ХИМИЯ И МЕХАНИКА ПОВЕРХНОСТЕЙ И КОНТАКТНЫЕ ЗАДАЧИ

Колесников В.И., Мигаль Ю.Ф., Доронькин В.Н. Квантово-химический анализ межатомных взаимодействий на зернограничных поверхностях в стали 8

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ

Лаптева В.Г., Алисин В.В., Куксенова Л.И., Щербаков Ю.И., Хренникова И.А., Якушкина В.С., Кораблева Е.С., Саванина Н.Н. Влияние состава наноструктурных порошков ЧСЦ на изнашивание керамики 14

СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПРИСАДКИ

Гологан В.Ф., Туртыгин В.В., Туртыгина Т.В., Цыкиновский П.Е. Разработка и исследование металлоплакирующих СОЖ 20

РАСЧЕТ, КОНСТРУИРОВАНИЕ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

Громаковский Д.Г., Макарьянц М.В., Ткаченко С.И. Особенности системного обеспечения работоспособности узлов трения космической техники 28

ТРИБОЛОГИЯ ПРОЦЕССОВ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ

Наумов А.Г., Латышев В.Н. О возможности использования микрокапсулированных СОТС при лезвийном резании материалов 34

ИНФОРМАЦИЯ

Ярофи – 2010 46

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.

© **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

12 December 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-President
Academician of IEA
YU.M. LUZHNOV

Editorial advisory board:

MOSCOW
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

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. 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

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

Fedorov S.V. Calculation of the true friction volume 3

Physics, chemistry and mechanics of surfaces and contact problems

Kolesnikov V.I., Migal Y.F., Doronkin V.I. Quantum-chemical analysis of interatomic interactions on grain-boundary surfaces in steel 8

Tribological materials technology and technology

Lapteva V.G., Alisin V.V., Kuksenova L.I., Shcherbakov J.I., Khrennikova I.A., Jakushkina V.S., Korableva E.A., Savanina N.N. The influence of the nanostructural powders ЧСЦ composition on wear of ceramics 14

Lubricants and addition agents

Gologan V.F., Turtygin V.V., Turtygina T.V., Tsikinovskiy P.E. Development and study of metal plating lubrication-cooling liquids 20

Calculation, designing and friction units operation

Gromakovsky D.G., Makarjants M.V., Tkachenko S.I. Features of system maintenance of working capacity of knots of a friction of space technics 28

Tribology of metalworking processes

Naumov A.G., Latyshev V.N. To a possibility of application of microcapsulating metal working oils for cutting of materials 34

Information

Iarofi – 2010 46

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 621.891;536;531.43

С.В. Фёдоров, *д-р техн. наук (Калининградский государственный технический университет)*

Расчет истинного объема трения

Предлагается метод расчета размера критического объема трения, адекватного понятию современной трибологии о равновесной шероховатости. Этот размер объема трения представляет собой размер элементарной трибологической системы, которая в рамках модели движущегося критического объема трения есть элементарный триботрансформатор энергии.

Calculation method for estimation of critical friction volume dimension is proposed. Into the modern tribology this critical volume has sense of equilibrium roughness and it is the elementary tribosystem too. The model of moving critical friction volume we examine. In framework of this model, the critical friction volume is the elementary friction transformer.

Ключевые слова: поверхность, шероховатость, объем трения, равновесность, упругость атомная, наноструктура.

Key words: surface, friction volume, equilibrium, atom's elasticity, nanostructure.

Фундаментальное для современной трибологии понятие некоего *равновесного критического объема трения* (адекватного понятию о равновесной шероховатости [2]) характеризует уровень приспособления трибосистемы к трибологическому процессу [1]. В рамках модели движущегося критического объема трения [3] приспособившихся поверхностей знание этого элементарного (истинного) объема трения V_f^* необходимо для выполнения расчетной оценки совместимого трения.

Для определения равновесного элементарного (истинного) объема трения V_f^*, на наш взгляд, плодотворно рассмотрение модели равновесного идеального (атомного) трения, в связи с понятием современной трибологии о равновесной шероховатости. Если предположить, что поверхность номинальной площади трения A_a идеально гладкая, т.е. образована атомной шероховатостью (рис. 1, *а*), и внешняя нагрузка N^* равномерно распределена по всей поверхности, то тогда линейный размер (объем) равновесной атомной шероховатости возможно определить как размер (объем) области упругого и обратимого восприятия максимальной (равновесной) внешней нагрузки в пределах заданной поверхности. В этом случае физический смысл равновесной шероховатости становится понятен, ибо это объем, который способен воспринимать максимальную для данной поверхности внешнюю силу без каких-либо необратимых изменений в самом этом объеме, так как принцип равновесия – это принцип неизменности состояния – полной обратимости процесса.

Поскольку реальное трение всегда дискретно и стремится к минимизации, то объем реальной равновесной шероховатости для точки 3 равновесного трения [4] должен в точности соответствовать объему идеальной атомной равновесной шероховатости для данных поверхностей, ограниченных номинальным контуром A_a (рис. 1).

С другой стороны, равновесная шероховатость и соответственно равновесная нагрузка принадлежат трению (поверхности), следовательно, они должны характеризовать некоторый принцип, отличающий трение (поверхность) или же поверхностное деформирование от процесса традиционно объемного деформирования. Другими словами, принцип равновесной шероховатости должен быть одновременно и характеристикой поверхности (трения). К сожалению, в настоящее время в литературе нет четкого количественного определения поверхности.

В этом смысле равновесную шероховатость и максимальную равновесную нагрузку достаточно четко можно определить по принципу

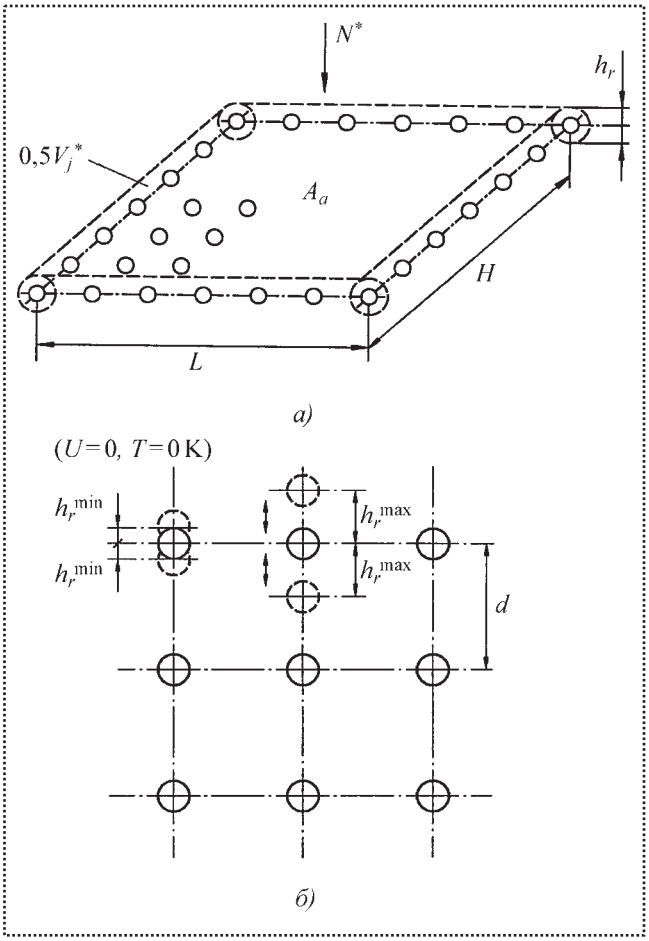


Рис. 1. Условная схема к расчету идеального (атомного) шероховатого объема трения

идеального (атомного) трения, с присущими ему параметрами равновесности (полной обратимости).

Идеальный атомный равновесный объем, принадлежащий одной поверхности трения, можно рассчитать, зная ее номинальную площадь A_a и высоту атомной равновесной (обратимой) шероховатости h_r – размер области (см. рис. 1) идеального упругого равновесного смещения:

$$V_f^* = A_a 2h_r. \qquad (1)$$

Размер области предельного упругого равновесного смещения атомов можно определить ориентировочно следующим образом. Известно, что область упругого смещения атомов находится в пределах амплитуды их колебаний. Величина максимальной амплитуды колебаний атомов для элементов, находящихся в середине Периодической таблицы (Fe, Cu, Ge и др.), при комнатной температуре составляет сотые доли от атомного радиуса [5]. Более точные расчеты [5] определяют максимальную амплитуду атомных смещений 0,2Å = $0{,}2\cdot10^{-10}$ м (из условия, что тепловая или потенциальная энергия атома (осциллятора) максимальна и равна kT). Поскольку речь идет об идеальной равновесной (обратимой) шероховатости, то оценивать область упругих равновесных смещений (колебаний) следует при температуре 0 K и давлении $p = 0$. Только в этом случае с термодинамической точки зрения мы будем иметь корректные условия полной обратимости процесса, так как величина необратимости, интегрально оцениваемая энергетическим параметром – скрытой (свободной) энергией u_e, только в этих условиях равна нулю (см. рис. 1, *б*).

Кроме того, только лишь для этих условий равновесные смещения будут характеризовать именно поверхность. Реальные атомные связи имеют жесткий характер. Поэтому упругие атомные смещения, превышающие величину предельной обратимой амплитуды ($T = 0$ K, $p = 0$), будут неизбежно вызывать смещения соседних (подповерхностных) атомов – атомов второго ряда, как минимум. Естественно, это будет уже не поверхностное взаимодействие, а объемное (рис. 2).

Таким образом, величину идеальной атомной равновесной поверхностной шероховато-

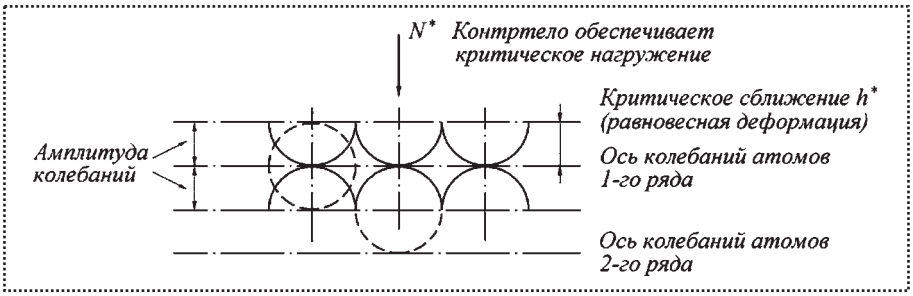


Рис. 2. К характеристике поверхности и поверхностного взаимодействия

сти следует определять экстраполяцией максимальной амплитуды колебаний атомов к температуре абсолютного нуля (0 К). На основании этого анализа получаем величину идеальной равновесной шероховатости $h_r \cong$ $\cong 0{,}2\cdot10^{-13}$ м и размер равновесного объема трения:

$$V_f^* = A_a 2h_r \cong 4A_a\cdot10^{-14} \quad \text{м}^3. \qquad (2)$$

Положим, что имеем некую элементарную номинальную площадь трения A_{ai}, соизмеримую с максимальным шагом (базовая длина) волны поверхности (около 10 мм [6]), т.е. $A_{ai} = 1\cdot10^{-4}$ м^2, тогда $V_f^* \cong 4\cdot10^{-18}$ м^3. Если теперь определить величину равновесной шероховатости h_R реального трения, сосредоточенного в некотором контактном равновесном объеме $V_f^* \cong 4\cdot10^{-18}$ м^3, например, с моделью сферического распределения материала на поверхности (рис. 3, *а*), то получим, м:

$$h_R = R_{\text{сф}} = \sqrt[3]{\frac{3V_{\text{сф}}}{4\pi}} = \sqrt[3]{\frac{3\cdot4\cdot10^{-18}}{4\pi}} \cong 0{,}985\cdot10^{-6}, \qquad (3)$$

что близко к параметру равновесной (приработочной) шероховатости по теории И.В. Крагельского [2], которая равна порядка 1 мкм.

Таким образом, имеет место хорошее соответствие оценочных (приближенных) расчетов реальному эксперименту.

В дальнейшем при расчете параметров реального трения более удобно пользоваться моделью шероховатости в виде прямоугольного распределения материала на поверхности (рис. 3, *б*). Для этого случая объем равновесной шероховатости, равный $2\cdot10^{-18}$ м^3, можно представить в виде прямоугольника со стороной $1{,}26\cdot10^{-6}$ м.

Как следует из формулы (3), объем реальной равновесной шероховатости зависим от размера номинальной площади A_a. В.С. Комбаловым определены приработочные шероховатости (таблица) для 26 различных по-

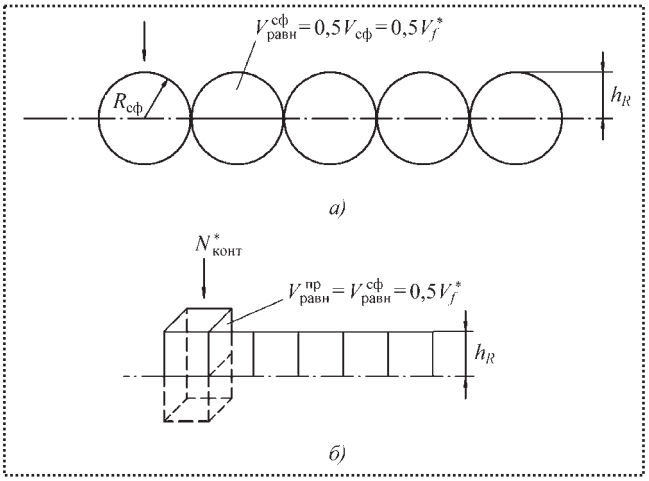


Рис. 3. Модельные схемы контактирования неровностей

верхностей (пар трения) [7]. Средняя приработочная (равновесная) шероховатость $\overline{h}_R$, вычисленная для этих пар трения, равна $2{,}68\cdot10^{-6}$ м. Соответственно, средний размер равновесного объема трения имеет величину $\overline{V}_f^* = 10{,}08\cdot10^{-18}$ м^3.

Для различных пар трения, имеющих одинаковый размер номинальной площади A_a, величины равновесной шероховатости h_r и равновесного (критического) объема трения V_f^*, следовательно, одинаковы.

Этот вывод имеет важное значение, так как открывает пути расчета реального трения с использованием энергетических уравнений трения [1]. Факт существования некоторого критического объема трения V_f^* в совокупности с интегральной характеристикой материалов – критической плотностью внутренней (скрытой) энергии u^* позволяет рассматривать эти уравнения в качестве основных инженерных расчетных уравнений трения для решения широкого круга задач (как прямых, так и обратных) оценки и подбора совместимых (оптимальных) пар трения.

Полученные результаты позволяют определять критические параметры процесса трения: мощность $\dot{W}_T^*$, силу трения F^*, нагрузку N^* для любой пары трения и, соответственно, что очень важно, построить сравнимые гомологические ряды критических параметров

Ï àðàì åòðû ø åðî õîâàòî ñòè ï ðèðàáî òàí í û õ ï î âåðõí îñòåé ($\bar{h}_R$ = 2,68 мкм) [7]

Исследуемый объект	*R*max	*r*	*b*	ν	*Rz*	Δ
	мкм				мкм	
Поверхности стальных деталей в местах уплотнений резиновыми манжетами	0,72	184	3,1	3,0	0,13	$2{,}7\cdot10^{-3}$
Подшипник скольжения (сталь 2Х13)	0,84	53	1,8	2,0	0,15	$1{,}1\cdot10^{-2}$
Поршневое кольцо (чугун)	0,15	100	3,0	1,8	0,03	$1{,}1\cdot10^{-3}$
Подшипник скольжения (втулка из металлокерамики, содержащей MoS_2)	5,40	77	3,5	1,8	0,09	$3{,}5\cdot10^{-2}$
Наружный диск муфты станка 1А62	0,60	46	1,4	2,1	0,10	$1{,}10\cdot10^{-2}$
Внутренний диск муфты станка 1А62	1,84	60	2,0	2,2	0,32	$1{,}9\cdot10^{-2}$
Направляющие (паровоздушный молот)	3,60	19	1,0	1,2	0,67	$0{,}2\cdot10^{-2}$
Кольцо блока шестерен	7,3	35	1,6	1,4	1,27	$1{,}5\cdot10^{-1}$
Диски и колодки самолетного тормоза из материалов:						
ретинакс	4	30	4,0	2,4	0,70	$7{,}4\cdot10^{-2}$
ФМК-11	6,5	120	3,5	2,5	1,15	$3{,}3\cdot10^{-2}$
МКВ-50	6	15	1,1	2,1	0,91	$3{,}7\cdot10^{-2}$
ЧНМХ	4	76	1,0	2,1	0,65	$5{,}3\cdot10^{-2}$
сталь 30ХГСА	4...5	82	1,0	2,2	0,78	$5{,}5\cdot10^{-2}$
Гильза цилиндрическая	1,2	1000	–	1,0	0,04	$1{,}2\cdot10^{-3}$
Поршневое кольцо	0,48	270	–	0,4	0,02	$1{,}7\cdot10^{-3}$
Коленчатый вал (коренные и шатунные шейки)	1,57	500	–	1,2	0,05	$3{,}1\cdot10^{-3}$
Вкладыши подшипника коленчатого вала	2,6	300	–	–	0,42	$8{,}6\cdot10^{-3}$
Поршневой палец	6,7	300	–	–	0,11	$2{,}2\cdot10^{-2}$
Втулка верхней головки шатуна	7,0	250	–	–	0,112	$2{,}8\cdot10^{-2}$
Поршень (отверстия в бобышках)	1,1	220	–	–	0,18	$5{,}0\cdot10^{-3}$
Форсунка дизеля	0,6	35	3,8	1,9	0,1	$1{,}7\cdot10^{-2}$
Шатунный вкладыш автомобиля "Волга"	1,3	54	1,2	2,0	0,24	$2{,}4\cdot10^{-2}$

трения для любых сочетаний материалов (чистых металлов) пар трения (при A_a = const) в зависимости от обобщенной интегральной характеристики материала – критической плотности внутренней (скрытой) энергии $u^* = \Delta H_s$. И наоборот, по результатам экспресс-эксперимента можно определить влияние различных факторов (легирование, термическая обработка и др.) на изменение критической величины Δu_e^* реальных сплавов, обусловленной изменением исходных (наследственных) свойств сплавов – $\Delta u_e^* = u^* - u_0$.

Выполненный выше расчет критического объема (равновесной шероховатости) трибоконтакта приближенный, ибо он основывается на приближенной величине идеальной равновесной амплитуды атомных колебаний. Уточнение этого расчета возможно следующим образом. В рамках трибоэргодинамики [3] при идеальной (наиболее полной) эволюции трибоконтакта критический объем трения трансформируется структурно на совокупность идеальных трибоподсистем – механических (нано) квантов. Известны размер этого механического кванта – 8103,08 атомных осцилляторов и количество таких квантов в объеме одной элементарной трибосистемы (критического объема) – $0{,}63\cdot10^8$. Ме-

ханический квант – это теоретический кристалл сферической формы с атомарной шероховатостью [8, 9].

Средний объем одного механического кванта по модели куба, состоящего из атомарных кубических ячеек – $(e^3)^3 = (W)^3 = (20{,}08553695)^3 = 8103{,}083969$ равен, м^3:

$$\bar{V}_{MQ} = \bar{V}_{ат} \cdot e^9 = 23{,}887872 \times \times 10^{-30} \cdot 8103{,}08396 = 19{,}35654324 \cdot 10^{-26}.$$

Объем тела трения (1TS – одна трибосистема V_f^*) можно определить через размер одного механического кванта и число этих квантов в объеме одной элементарной трибосистемы, м^3:

$$V_f^* = 0{,}63 \cdot 10^8 \bar{V}_{MQ} = 0{,}63 \cdot 10^8 \times \times 19{,}35654324 \cdot 10^{-26} = 12{,}19462224 \cdot 10^{-18}. \quad (4)$$

Радиус равновесного объема трения (элементарной трибосистемы (1TS) как сферического образования равен, м:

$$R_{TS} = \sqrt[3]{\frac{3V_f^*}{4\pi}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 12{,}19462224}{4 \cdot 3{,}14159}} = = 1{,}427885455 \cdot 10^{-6}. \quad (5)$$

Соответственно амплитуда равновесных атомных колебаний с учетом выражений (1) и (2) определяется как, м:

$$\bar{h}_r = \frac{V_f^*}{2A_{ai}} = \frac{12{,}19462224 \cdot 10^{-18}}{2 \cdot 1 \cdot 10^{-4}} = = 6{,}09731112 \cdot 10^{-14}. \quad (6)$$

Диаметр элементарной трибосистемы равен, мкм:

$$D_{TS} = 2R_{TS} = 2 \cdot 1{,}427885455 \cdot 10^{-6} = = 2{,}8557709 \cdot 10^{-6} = 2{,}85. \quad (7)$$

Средний размер равновесной шероховатости Rmax = 2,68 мкм (см. табл.) [7]. Если представить распределение материала на поверхности трения в виде его сферического равновесного распределения, то, сравнивая диаметр D_{TS} элементарной трибосистемы с параметром Rmax равновесной шероховатости, мы имеем достаточное соответствие расчета и практики.

Выводы

1. Размер равновесного объема трения, адекватного понятию о равновесной шероховатости и определяющий, по сути, размер элементарной трибосистемы (элементарного энергетического триботрансформатора), возможно оценивать по модели идеальной атомной шероховатости в пределах элементарной номинальной площади трения.

2. Предложенные приближенный и уточненный расчеты этого критического объема трения имеют достаточную корреляцию с измеренными ранее параметрами шероховатостей реальных приработанных поверхностей.

Библиографический список

1. **Фёдоров С.В.** Модель движущегося критического объема трения // Трение и смазка в машинах и механизмах. М.: Машиностроение, 2010. № 4. С. 3–7.

2. **Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.** Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.

3. **Фёдоров С.В.** Основы трибоэргодинамики и физико-химические предпосылки теории совместимости. Калининград: КГТУ, 2003. 416 с.

4. **Фёдоров С.В.** Термодинамический метод оценки принципиальных значений коэффициента трения при эволюции трения скольжения. Ч. I. // Трение и смазка в машинах и механизмах. М.: Машиностроение, 2008. № 10. С. 35–39.

5. **Уэрт Ч., Томсон Р.** Физика твердого тела / Ч. Уэрт, Р. Томсон. М.: Мир, 1966. 567 с.

6. **Основы трибологии** (трение, износ, смазка): учебник для технических вузов. 2-е изд. переработ. и доп. / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше и др. / под общей ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2001. 664 с.

7. **Комбалов В.С.** Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. М.: Наука, 1974. 112 с.

8. **Фёдоров С.В.** Расчет износа зубчатого зацепления по модели механического (нано) кванта // Трение и смазка в машинах и механизмах. М.: Машиностроение, 2010. № 5. С. 33–39.

9. **Fedorov S.V.** The Mechanical Quantum of Dissipative Friction Structures is the Elementary Tribonanostructure // Proceedings of World Tribology Congress 2009 (6–11 September 2009): Japanese Society of Tribologists. Kyoto, Japan. P. 926.

Контактные координаты автора

Фёдоров Сергей Васильевич – e-mail: fedorov@klgtu.ru

ФИЗИКА, ХИМИЯ И МЕХАНИКА ПОВЕРХНОСТЕЙ И КОНТАКТНЫЕ ЗАДАЧИ

УДК 544.18:539.4

В.И. Колесников, *академик РАН, д-р техн. наук (Ростовский государственный университет путей сообщения),* **Ю.Ф. Мигаль,** *д-р физ.-мат. наук (Южный научный центр РАН),* **В.Н. Доронькин,** *канд. хим. наук (Ростовский государственный университет путей сообщения)*

Квантово-химический анализ межатомных взаимодействий на зернограничных поверхностях в стали[1]

Проведены квантово-химические расчеты многоатомных кластеров, моделирующих границы между зернами в поверхностном слое стали. Показано, что степень прочности связи сегрегированных атомов с атомами железа в поверхностном слое металла является существенным фактором, влияющим на износостойкость.

Quantum-chemical calculations of many atom clusters modeling boundaries between grains in surface layer of steel are performed. It is shown that the degree of strength of bond of segregated atoms with iron atoms in a surface layer of a metal is a significant factor influencing the wear resistance.

Ключевые слова: межатомные взаимодействия, зернограничные поверхности, износостойкость стали.

Key words: interatomic interactions, grain-boundary surfaces, wear resistance of steel.

Введение

Исследование межатомных взаимодействий на поверхности твердых тел позволяет на микроскопическом уровне выявлять механизмы различных явлений, происходящих на поверхности, и глубже понять происхождение различных свойств материалов. Современные квантово-химические методы дают возможность достаточно точно оценить энергию взаимодействий, определить равновесные расстояния между атомами, установить направление химических процессов и т.д. В данной работе с помощью методов квантовой химии предпринята попытка показать, как взаимодействие между атомами различных элементов, находящихся на внешних и внутренних поверхностях стали, влияет на прочность и износостойкость изделий.

Известно, что износостойкость стали и других поликристаллических материалов во многом определяется свойствами границ между зернами поверхностного слоя. Несмотря на то, что этот слой по структуре зерен может существенно отличаться от внутренних областей поликристаллов, механизмы разрушения поверхности и внутренних областей имеют много общего. Одной из причин разрушения поликристаллов, указываемой в литературе, является зернограничная сегрегация, в ходе которой из объема зерен на границу между ними выходят атомы примесных и легирующих элементов. В результате связь между зернами может ослабляться. Эта идея была высказана давно, но, несмотря на активные экспериментальные исследования явления зернограничной сегрегации, в настоящее время отсутствуют четкие теоретические представления о связи этого явления с механизмом разрушения поликристаллических материалов [1, 2].

Существуют различные точки зрения на то, каким образом сегрегированные атомы способствуют разрушению. Одна из гипотез ба-

[1]Материалы Научно-технической конференции "Трибология – машиностроению" (2010).

зируется на том, что в процессе зернограничной сегрегации связь металл–металл заменяется на более слабую или более сильную связь металл–сегрегированный атом [1, 2]. В подтверждение этой гипотезы в работе [3] были проведены расчеты энергии, необходимой для разрыва связи между зернами. При этом использовались данные только об энтальпии сублимации и размерах атомов исследуемых веществ. Результаты этих расчетов, несмотря на упрощенность подхода, дают основание полагать, что, действительно, величина энергии связи атомов, приходящаяся на единицу площади, во многом определяет способность сегрегированных атомов ослаблять или упрочнять границы зерен.

Появившиеся в последние два десятилетия методы квантово-химических расчетов, основанные на приближении *теории функционала плотности* (DFT), позволяют провести более точный, чем в работе [3], анализ химических взаимодействий, влияющих на разрушение металлов. Указанные методы дают возможность изучать соединения переходных металлов, включающие сотни атомов. Они оказались эффективными при изучении различных явлений, в которых в той или иной мере проявляются химические взаимодействия: адсорбции молекул на поверхности твердых тел, гомогенного и гетерогенного катализа, биохимии и др.

Поэтому квантово-химический анализ изменений износостойкости стали, вызванных зернограничной сегрегацией, проводился с помощью пакета программ ADF [4], основанного на приближении DFT. Взаимодействия между зернами при наличии сегрегированных атомов изучались с помощью модельных многоатомных кластеров. Этот анализ позволяет убедиться в том, что появление сегрегантов на межкристаллитных границах является не сопутствующим эффектом, а основной причиной ослабления прочности связи между кристаллитами и последующего за этим разрушения поверхностного слоя металла.

Используемый квантово-химический метод позволяет провести систематизацию межатомных взаимодействий на зернограничных поверхностях, оценить совместимость железа с другими элементами на этих поверхностях, связать эту совместимость с Периодическим законом Д.И. Менделеева.

Выбор кластерной модели

Полный квантово-химический анализ резко неоднородной макроскопической системы, какой является поликристалл, практически невозможен из-за огромного количества межатомных взаимодействий в системе. Выход состоит в том, что из поликристалла выделяется некоторый микроскопический объем (многоатомный кластер), в котором исследуемое явление может быть детально изучено. Кластер, имитирующий сегрегацию в поликристаллическом материале, должен содержать некоторое количество атомов матрицы (из прилегающих слоев двух соседних зерен), а также сегрегированных атомов, расположенных на границе.

В качестве рассчитываемых характеристик были выбраны энергия связи $E_{св}$ кластера и межатомные расстояния. Энергия связи кластера, взятая с обратным знаком, представляет собой энергию, которую нужно затратить для разрыва всех связей в кластере. Проведенные расчеты кластеров разных размеров [5] показали, что кластер, состоящий из 18 атомов, можно рассматривать как минимальный кластер, с помощью которого можно исследовать явления, происходящие при изменениях химического состава системы.

При моделировании условий, при которых происходит сегрегация, использовали тот факт, что на наиболее узком участке границы между зернами в поликристалле (т.е. в месте контакта зерен) ширина границы порядка постоянной решетки [6]. Это позволило рассмотреть следующую простую модель границы (рис. 1, *а*): в 18-атомном кластере железа $Fe_2Fe_6Fe_2Fe_6Fe_2$, состоящем из 5 слоев, атомы из среднего слоя заменены сегрегированными

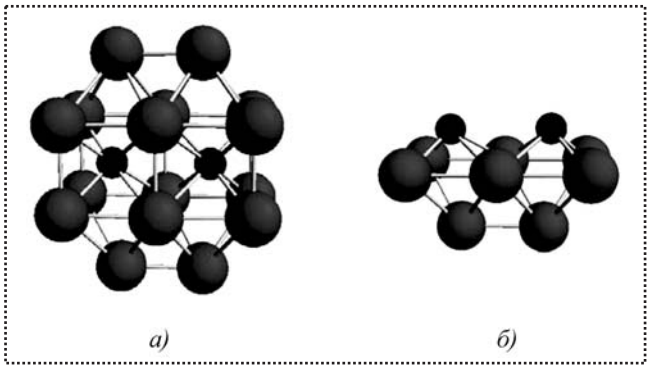


Рис. 1. Кластеры с сегрегированными (*а*) и адсорбированными (*б*) атомами углерода: крупные частицы соответствуют атомам Fe, мелкие – атомам C

атомами (в приведенных структурных формулах атомы группируются по горизонтальным слоям, снизу вверх). При этом два верхних и два нижних слоя имитируют соответственно верхнее и нижнее зерна поликристалла, а средний слой представляет собой границу между зернами. Безусловно, такая модель не учитывает всего разнообразия условий, важных для процесса сегрегации и проблемы износостойкости. Основное назначение предлагаемой модели – во-первых, оценить влияние ближайшего атомного окружения на химическую связь между сегрегированными атомами и атомами матрицы в месте контакта зерен и, во-вторых, изучить, как эта связь влияет на прочность поликристалла.

Если в этой модели убрать атомы верхнего зерна (рис. 1, *б*), то оставшиеся атомы (нижнее зерно + слой примесных атомов) имитируют явление адсорбции на поверхности (100) железа. Сопоставление результатов расчетов, относящихся к двум близким явлениям – сегрегации элементов на межкристаллитной границе и адсорбции на свободной поверхности железа – поможет выяснить, почему выводы, полученные в работе [3] на основе данных о сублимации (явлении, характерном для внешней поверхности), оказались справедливыми для явления зернограничной сегрегации, характерного для внутренних поверхностей в поликристалле.

Расчеты энергии связи кластеров, содержащих адсорбированные и сегрегированные атомы

Были проведены расчеты энергии связи $E_{св}$ кластеров, которые наряду с атомами железа содержали адсорбированные и сегрегированные атомы химических элементов с порядковыми номерами от 1 до 30 (от водорода до цинка). Эти дополнительные атомы размещались либо на внешней поверхности кластера (в случае адсорбции), либо в среднем слое (в случае сегрегации). В обоих случаях рассматривалось положение дополнительных атомов над центрами квадратов из атомов железа (позиция fourfold).

Сопоставляя величины $E_{св}$ для кластеров, содержащих адсорбированные атомы, и кластеров, состоящих только из атомов Fe, можно оценить прочность связи различных атомов с железом. В случае когда адсорбированные атомы размещаются над центрами квадратов, легко определить, какая из связей прочнее: Fe–Fe или Fe–X (символом X будем обозначать как адсорбированные, так и сегрегированные атомы). Более прочной, очевидно, будет связь, соответствующая кластеру с большей по модулю энергией связи.

В табл. 1 представлены значения $E_{св}$ для кластеров с адсорбированными атомами. Легко видеть, что атомы углерода и молибдена более прочно связаны с поверхностью железа, чем атомы самого железа. Менее прочно связаны с поверхностью атомы лития, серы, алюминия и меди.

Результаты расчетов для кластеров, содержащих сегрегированные атомы, представлены в табл. 2. Энергия связи кластеров, содержащих атомы углерода, азота, марганца, молибдена, оказывается ниже, чем энергия связи кластера того же размера, состоящего из чистого железа. Наоборот, атомы лития, кремния, фосфора, серы, меди и никеля, хотя и вступают в химическую связь с железом, ослабляют связь между зернами, поскольку энергия связи соответствующих кластеров

1. Ýíåðãèÿ ñâÿçè àäñîðáöèîííûõ êëàñòåðîâ

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			0
1	H **–63,7**										He **–55,5**
2	Li **–61,4**	Be **–65,0**	B **–71,2**	C **–75,1**	N **–76,4**	O	F				Ne
3	Na **–59,9**	Mg **–60,4**	Al **–65,5**	Si **–70,0**	P **–71,4**	S **–69,0**	Cl				Ar
4	K **–59,5**	Ca **–62,1**	Sc **–68,2**	Ti **–72,0**	V **–74,5**	Cr **–75,0**	Mn **–75,0**	Fe **–74,0**	Co **–72,9**	Ni **–67,0**	
	Cu **–63,7**	Zn **–60,3**	Ga	Ge	As	Se	Br				Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo **–76,1**	Tc	Ru	Rh	Pd	

П р и м е ч а н и е. В клетках с элементами А приведены значения энергии кластеров $Fe_2Fe_6A_2$ (эВ).

меньше, чем энергия связи кластера из чистого железа.

Сопоставляя характеристики атомов в адсорбированном и сегрегированном состояниях, можно заключить, что атомы, слабо связываемые свободной поверхностью железа, также слабо взаимодействуют с железом на межкристаллитной границе. Видимо, прочность связи в большей степени зависит от типа связываемых атомов, чем от числа и расположения атомов ближайшего окружения. Хотя зависимость связи от ближайшего окружения, безусловно, существует, на качественном уровне при выявлении влияния элементов на износостойкость этот факт существенно не сказывается. Кроме того, мы убеждаемся, что прочность связи – величина, достаточно стабильная по отношению к методам оценки. Это подтверждается, в частности, тем, что результаты расчетов качественно согласуются с результатами в работе [3], несмотря на большое различие в подходах.

2. Ýíåðãèÿ ñâÿçè ñåãðåãàöèîííûõ êëàñòåðîâ

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			0
1	H **–129,4**										He
2	Li **–120,6**	Be **–127,6**	B **–138,7**	C **–143,2**	N **–140,9**	O **–132,9**	F				Ne
3	Na **–117,7**	Mg **–120,8**	Al	Si **–133,3**	P **–134,9**	S **–131,2**	Cl				Ar
4	K **–116,9**	Ca **–121,8**	Sc **–129,8**	Ti **–135,9**	V **–140,0**	Cr **–141,7**	Mn **–141,9**	Fe **–140,2**	Co **–137,7**	Ni **–130,9**	
	Cu **–125,7**	Zn **–121,4**	Ga	Ge	As	Se	Br				Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo **–141,2**	Tc	Ru	Rh	Pd	

П р и м е ч а н и е. В клетках с элементами А приведены значения энергии кластеров $Fe_2Fe_6A_2Fe_2Fe_6$ (эВ).

Принимая во внимание все эти факты, можно сделать следующий важный вывод: атомы элементов, энергия связи которых с железом значительно меньше, чем энергия связи Fe–Fe, понижают износостойкость стали. Если эти атомы оказываются в месте контакта двух зерен в поверхностном слое поликристалла, слабая их связь с атомами железа оказывается существенным фактором, влияющим на прочность этого слоя.

Данные табл. 1 и 2 показывают также совместимость различных элементов с железом на его поверхности. Для элементов начала периода связь с железом слабая, но с ростом номера элемента вначале увеличивается, а затем, во второй половине периода, уменьшается. При перемещении вдоль группы, от второго периода к третьему, связь ослабевает. Это означает, что свойства химической связи различных элементов с железом находятся в периодической зависимости от заряда ядра атомов, что соответствует Периодическому закону Д.И. Менделеева. Разупрочняющими являются щелочные и щелочно-земельные металлы, инертные газы. Кроме того, к разупрочняющим относятся элементы из средней части третьего периода (Si, P, S). Как известно, фосфор и сера входят в состав сталей и являются элементами, ухудшающими их свойства. Как мы видим, это обусловлено малым значением энергии связи этих элементов с железом.

Расчеты энергии связи кластеров, содержащих сегрегированные атомы двух элементов

Опираясь на полученные результаты, можно ставить следующую задачу – найти способы уменьшить негативное воздействие атомов разупрочняющих элементов, присутствующих в стали, на износостойкость стали. Один из таких способов – введение в состав металла элементов, увеличивающих энергию связи между зернами и тем самым нейтрализующих действие разупрочняющих элементов. Атомы таких элементов, в зависимости от их активности, могли бы полностью или частично вытеснять атомы разупрочняющих элементов с зернограничной поверхности.

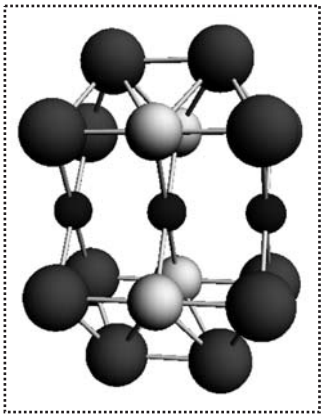


Рис. 2. Кластер, содержащий два типа сегрегантов (атомы бора в среднем слое блокируют выход атомов серы, находящейся внутри верхнего и нижнего зерен железа)

В расчетах изучена возможность блокирования выхода атомов одних элементов на зернограничную поверхность с помощью атомов других элементов. Для того, чтобы такое блокирование было возможно, необходимо, чтобы полная энергия связи кластера, в котором блокируемые атомы находятся на поверхности, была выше энергии связи кластера, в котором блокируемые атомы находятся внутри зерен (рис. 2).

В табл. 3 представлены данные об энергии связи сегрегационных кластеров, содержащих два типа сегрегантов. Атомы бора могут блокировать выход атомов серы и фосфора на зернограничную поверхность. Атомы углерода и азота могут блокировать выход атомов серы.

Важный вопрос состоит в том, каким образом и в каком количестве вводить, например, бор в состав стали. Бор является элементом, который слабо растворяется в железе и по этой причине не входит в состав зерен. Поэтому при появлении в поликристалле железа небольшого количества атомов бора они в первую очередь будут размещаться на зернограничных поверхностях, вытесняя оттуда серу и фосфор и увеличивая тем самым прочность связи между зернами. Если количество бора увеличить, то внутри железа будут возникать химические соединения бора с железом, углеродом и другими металлами – бориды и карбиды. Эти соединения значительно уступают в

3. Ýíåðãèÿ ñâÿçè â ñåãðåãàöèîííûõ êëàñòåðàõ, ñîäåðæàùèõ äâà òèïà ñåãðåãàíòîâ

Состав зерен	Сегрегационный слой	Энергия связи кластеров, эВ			Энергия связи зерен, эВ
		Полный кластер	Без нижнего зерна	Нижнее зерно	
Fe_6S_2	B_3	–127,44	–68,11	–49,80	–9,53
Fe_6BS	SBS	–126,95	–70,75	–49,14	–7,06
Fe_6P_2	B_3	–133,59	–71,64	–52,21	–9,74
Fe_6BP	PBP	–131,67	–73,19	–51,58	–6,90
Fe_6S_2	C_3	–131,86	–74,88	–49,80	–7,18
Fe_6CS	SCS	–130,11	–73,19	–52,75	–4,17
Fe_6S_2	N_3	–131,59	–76,35	–49,80	–5,44
Fe_6NS	SNS	–129,08	–71,70	–52,76	–4,62
Fe_6S_2	Cu_3	–115,46	–59,34	–49,80	–6,32

прочности железа, и свойства железа будут ухудшаться. Таким образом, улучшать прочность можно только с помощью малых концентраций бора. Как было установлено в работах Н.П. Чижевского с сотрудниками, количество бора в стали не должно превышать тысячных долей процента.

Технически важный вопрос состоит в том, как ввести в поверхностные слои стали нужное количество бора. Один из способов – нанесение на поверхность самого бора или таких его соединений, из которых бор мог бы диффундировать в поверхностные слои стали.

Выводы

С помощью квантово-химических методов показано, что:

1. Степень прочности связи сегрегированных атомов с атомами железа в поверхностном слое металла является существенным фактором, влияющим на износостойкость изделий из стали.

2. Введение бора в небольших количествах в состав стали способствует вытеснению атомов серы и фосфора с зернограничных поверхностей и приводит к увеличению износостойкости стальных изделий.

Построенные таблицы энергии связи адсорбированных и сегрегированных кластеров, содержащие элементы с порядковыми номерами от 1 до 30, свидетельствуют о периодической зависимости энергии химической связи элементов с поверхностью железа от порядкового номера элементов. Этого факта, несмотря на приближенный характер вычислений, следовало ожидать, поскольку он соответствует Периодическому закону. Мы полагаем, что более точные расчеты подтвердят найденную нами зависимость. Такая зависимость может служить теоретической базой для предсказания прочностных свойств поликристаллических материалов, в которые вводятся различные легирующие добавки.

Библиографический список

1. **Анализ** поверхности методами оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / пер. с англ., под ред. Д. Бриггса, М.П. Сиха. М.: Мир, 1987. 598 с.

2. **Ермакова Т.В., Вологжанина С.А.** Влияние структурных изменений на свойства Fe–C сплавов // Промышленная безопасность труда. 2003. № 6. http://www.alf-center.com/pbt/magazine6/ermakova-1.shtml

3. **Seah M.P.** Adsorption-induced interface decohesion // Acta Metallurgica. 1980. V. 28. P. 955–962.

4. **te Velde G., Bickelhaupt F.M., van Gisbergen S.J.A. et al.** T. Chemistry with ADF // J. Comput. Chem. 2001. V. 22. P. 931–967.

5. **Колесников В.И., Мигаль Ю.Ф., Мижирицкая С.Н., Доронькин В.Н.** // Тремкмние и износ. 2008. Т. 29. № 2. С. 134–143.

6. **Орлов А.Н., Перевезенцев В.Н., Рыбин В.В.** Границы зерен в металлах. М.: Металлургия, 1980. 156 с.

Контактные координаты автора

Мигаль Юрий Федорович – e-mail: ymigal@mail.ru

УДК 533.924.621

В.Г. Лаптева, *канд. техн. наук,* **В.В. Алисин,** *канд. техн. наук,* **Л.И. Куксенова,** *д-р техн. наук,* **Ю.И. Щербаков, И.А. Хренникова** *(Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН),* **В.С. Якушкина, Е.С. Кораблева, Н.Н. Саванина** *(Обнинское научно-производственное предприятие "Технология")*

Влияние состава наноструктурных порошков ЧСЦ на изнашивание керамики*

Представлены результаты трибологических испытаний керамик составов $ZrO_2 + Al_2O_3$; $ZrO_2 + Y_2O_3$ и $ZrO_2 + Y_2O_3 + Al_2O_3$, изготовленных из наноструктурных порошков. Нанопорошки получены методом химического осаждения из растворов хлористых солей циркония и иттрия. Исследования проведены применительно к деталям машиностроительного назначения: волокам-заготовкам и втулкам подшипников. Показана зависимость изнашивания пар трения от состава керамики.

Results of the tribological investigation of the composition ceramics $ZrO_2 + Al_2O_3$; $ZrO_2 + 6\ \% Y_2O_3$ и $ZrO_2 + Y_2O_3 + Al_2O_3$, made from nanostructural powders, are presented. Nanopowders are received by chemical coprecipitations method from zirconium and yttrium chloric salts solutions. The research are conducted for machine detailes: drawing die and bearing plugs. Dependency of wear friction pair from composition of the ceramics is shown.

Ключевые слова: керамика, наноструктурные порошки, состав, изнашивание.

Key words: ceramics, nanostructural powders, composition, wear.

Постоянно растущие требования к эксплуатационным характеристикам машин и механизмов, создание новых конструкций ставят задачи разработки новых материалов трибологического применения с комплексом свойств, имеющих высокие значения износостойкости, антифрикционности, твердости, вязкости разрушения [1, 2].

Керамические материалы на основе частично стабилизированного диоксида циркония (ЧСЦ) обладают высокими значениями прочности, вязкости разрушения, твердости, коррозионной стойкости, возможностью получения очень высокой чистоты поверхности, что делает их перспективными материалами для триботехнического применения [3–5].

Из керамики ЧСЦ изготавливают режущий и сверлильный инструменты для обработки металлов и древесины, нитеводители и фильеры машин текстильного производства, медицинский инструмент, эндопротезы тазобедренных суставов и др.

Известно, что структура и свойства керамики, получаемой по порошковой технологии, зависят от свойств применяемых порошков и методов их обработки. В работе [6] было исследовано влияние технологии спекания на изнашивание керамики состава $ZrO_2 + 3\ \% Y_2O_3$ и показано, что эффективным методом повышения износостойкости деталей триботехнического назначения является технология спекания керамик при температуре $T = 1600$ °С.

Цель работы – определение влияния состава наноструктурного материала на основе ЧСЦ на его триботехнические характеристики применительно к деталям машиностроительного назначения, а именно, волокам-заготовкам и втулкам подшипников.

Испытываемые материалы. Триботехническим испытаниям подвергались *образцы из керамических материалов на основе диоксида циркония с различными оксидными добавками следующих составов:*

$ZrO_2 + Al_2O_3$;

*Работа выполнена в рамках государственного контракта № 02.523.12.3018.

Номер состава	Образец						Контр-образец
	Партия	Состав	σ, МПа	ρ, г/см^2	Пористость, %	Микротвердость, ГПа	Материал
1	АЦ-1	ZrO_2 +Al_2O_3	820	–		17,45	Сталь ШХ15
2	Т-85	ZrO_2 +6 % Y_2O_3	490...500	5,7...5,8	0...0,2	13,66	
	Т-90		490...500	5,85	0,2	16,6	Сталь У10А
3	ТФ-1	ZrO_2 + 6 % Y_2O_3+Al_2O_3	600	5,81	0,5	15,8	

ZrO_2 + 6 % мол. Y_2O_3;

ZrO_2 + 6 % мол. Y_2O_3 + Al_2O_3.

Порошки ZrO_2 и Y_2O_3 получали методом совместного химического осаждения гидроксидов из растворов хлористых солей: циркония хлорокиси и иттрия хлорида. В качестве осадителя применяли аммиак. Химическую реакцию осуществляли в реакционном аппарате GR-15 фирмы Buchi AG (Швейцария) с автоматическим контролем технологических параметров (температура, pH среды, скорость перемешивания и концентрация растворов солей).

Осажденные гели фильтровали, отмывали от анионов хлора дистиллированной водой, высушивали при 200 °С, прокаливали при температуре 1000 °С и измельчали в шаровой мельнице.

Процесс компактирования порошка проводили методом термопластичного литья под давлением. В качестве *временной технологической связки* (ВТС) использовали парафин. Технологические операции удаления ВТС и окончательного спекания проводили в печах фирмы Naberterm. Окончательное спекание компактов проводили при температуре 1600 °С в течение 1 ч. Скорость нагрева до температуры изотермической выдержки составляла 300 °С/ч [5].

Сведения об образцах представлены в таблице. Образцы имели форму пластин размером 10×10 мм^2 и были изготовлены Федеральным государственным унитарным предприятием "Обнинское научно-производственное предприятие "Технология".

В связи с тем, что настоящие исследования проводили применительно к парам трения стальная проволока–волока и стальной вал–втулка подшипника, контробразцы выполняли из стали ШХ15 или У10А, закаленной до твердости 57...60 HRC и 49...52 HRC соответственно.

Измерения микротвердости рабочих поверхностей образцов проводили по ГОСТ 9450–76 на приборе ПМТ-3 при нагрузке 200 г.

Шероховатость и износ рабочих поверхностей образцов измеряли на профилографе-профилометре мод. 201 завода "Калибр".

Методика испытаний на износостойкость

Испытания на износостойкость образцов материалов составов *1* и *2* проводили на однопозиционной машине трения с возвратно-поступательным движением сопрягаемых образцов, имеющих плоские поверхности трения [7] по форсированному режиму (ГОСТ 23.205–79. Ускоренные ресурсные испытания с периодическим форсированием режима).

Кинематическая схема машины трения показана на рис. 1, *а*. Основными узлами машины являются: двигатель *1*, эксцентрик *2*, кривошипно-шатунный механизм *3* и ползун *4*. Эксцентрик позволяет осуществлять движение с малыми перемещениями и большой частотой, что вносит дополнительное ужесточение режима трения для испытываемых пар. На ползуне *4* закрепляют подвижный образец

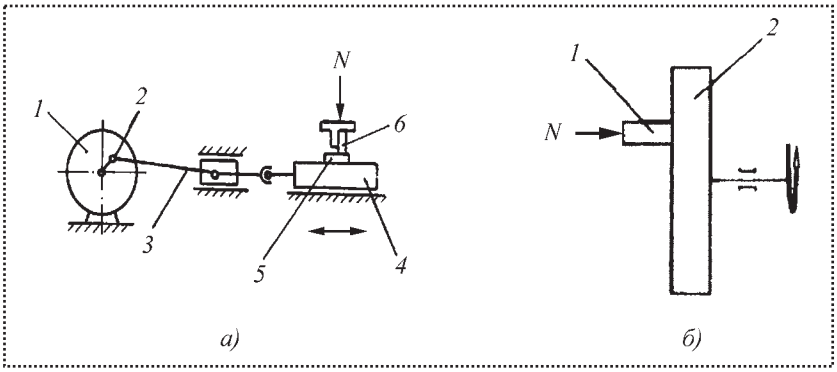


Рис. 1. Схемы испытаний на машине трения УМТ-1 образцов керамик:
а – составов 1 и 2 при возвратно-поступательном движении;
б – составов 2 и 3 при поступательном движении

5, который совершает возвратно-поступательное движение относительно неподвижного контробразца *6* с частотой 1400 мин$^{-1}$. Ход подвижного образца H = 0,5 мм, максимальная нагрузка на узел трения – 1250 Н. Неподвижный контробразец *6* закрепляют в рычаге, являющемся частью нагрузочного устройства.

Испытания проводили при смазывании поверхностей трения пластичным смазочным материалом солидол С (ГОСТ 4366–76), а также без смазывания при протирке спиртом поверхностей трения образцов после их установки на машину трения.

Перед испытаниями пары трения подвергали макроприработке, при которой достигалось равномерное распределение следов износа по всей рабочей поверхности образцов. Приработку проводили при смазывании индустриальным маслом И-20А (ГОСТ 20799–88) в условиях ступенчато повышаемых давлений от 20 до 85 МПа в течение 3,5 ч.

Далее, при смазывании солидолом испытания вели при давлении 85 МПа в течение 10,5 ч. Испытания всухую проводили при предельно допустимом давлении $p_д$ для каждой исследуемой пары в течение 3,5 ч; $p_д$ устанавливали для каждой пары трения по величине давления, до которого пары работали устойчиво, без возрастания коэффициента трения, сопровождающегося перегрузками и остановкой движения в паре. До и после каждого испытания образцы промывали в уайтспирите и просушивали.

Испытания на износостойкость образцов материалов составов *2* и *3* проводили на серийной универсальной машине трения УМТ-1.

Машина трения позволяет проводить испытания образцов по схеме "палец – диск" (рис. 1, *б*), в которой неподвижный испытуемый образец *1* прижимается к вращающемуся диску *2*. В качестве испытуемого образца используется образец-пластина (10×10×4 мм^3) из материала на основе ЧСЦ. Контробразец – вращающийся диск диаметром 12×10^{-2} м из закаленной инструментальной стали У10А (ГОСТ 5950–73). Образец торцевой поверхностью трется по плоскости вращающегося диска. Испытания проводили на трех образцах-пластинах из одного вида материала на основе ЧСЦ.

Пары трения испытывали при значении параметра pv = 10 МПа·м/с, а именно, давлениях p = 5 МПа и p = 2 МПа соответственно при скорости скольжения 2 и 5 м/с без смазки в течение 3...10 мин по неработавшей до этого поверхности диска.

Расчетные зависимости для определения среднего контактного давления и скорости скольжения имеют вид

$$p = N/F, \qquad (1)$$

$$v = \pi rn/30, \qquad (2)$$

где N – нормальная нагрузка на образец-пластину, Н; F – площадь трения образца-пластины, м^2; r – номинальный средний радиус дорожки трения, т.е. расстояние от оси вращения образца-диска до оси образца-пластины, м; n – частота вращения образца-диска, мин$^{-1}$.

Перед испытаниями пары трения подвергали приработке при силе прижима $N = 70$ Н в течение 3 мин. Измеряли площадь трения образца-пластины F и рассчитывали необходимые значения нормальной силы прижима образца-пластины к диску. Перед и после испытаний измеряли массу образцов-пластин на лабораторных аналитических весах с точностью 0,1 мг. Суммарный износ контробразцов дисков измеряли профилографированием дорожки трения на профилографе-профилометре мод. 201.

Интенсивность изнашивания при испытаниях всех исследуемых составов вычисляли по формуле

$$I = h/L, \quad (3)$$

где h – толщина изношенного слоя за путь трения L.

Помимо износов в процессе испытаний керамики составов 2 и 3 измеряли момент трения $M_{тр}$ между образцами

$$M_{тр} = Nfr, \quad (4)$$

где N – нормальная нагрузка на пару трения, Н; f – коэффициент трения; r – номинальный средний радиус дорожки трения, м.

Коэффициент трения определяли по формуле

$$f = M_{тр}/Nr. \quad (5)$$

Результаты эксперимента и обсуждение

Электронно-микроскопическое исследование морфологического строения полученного наноструктурного порошка состава 2 показало, что этот порошок состоит из агломератов размером 1...2 мкм, состоящих из наночастиц размером меньше 100 нм (рис. 2). Размер кристаллитов наночастиц по данным рентгеноструктурного анализа составил 20...45 нм. Нанопорошок имеет удельную поверхность – 6,2 $м^2/г$, эффективную плотность – 5,9 $г/см^3$. Фазовый состав представлен, в основном, тетрагональной модификацией (95 %).

Результаты измерений физико-механических свойств показали, что керамический материал ЧСЦ обладает высокими плотностью и микротвердостью. Механические свойства (предел прочности, твердость, вязкость разрушения) относятся к структурно-чувствительным свойствам [8]. Использование наноструктурных порошков способствует получению компакта с более однородным распределением агломератов частиц по размерам, равномерной пористостью, что, в свою очередь, обеспечивает действие механизма диффузионно-вязкого течения при спекании [5]. Все это позволяет получать керамику с однородной структурой и размером кристаллитов 200...500 нм.

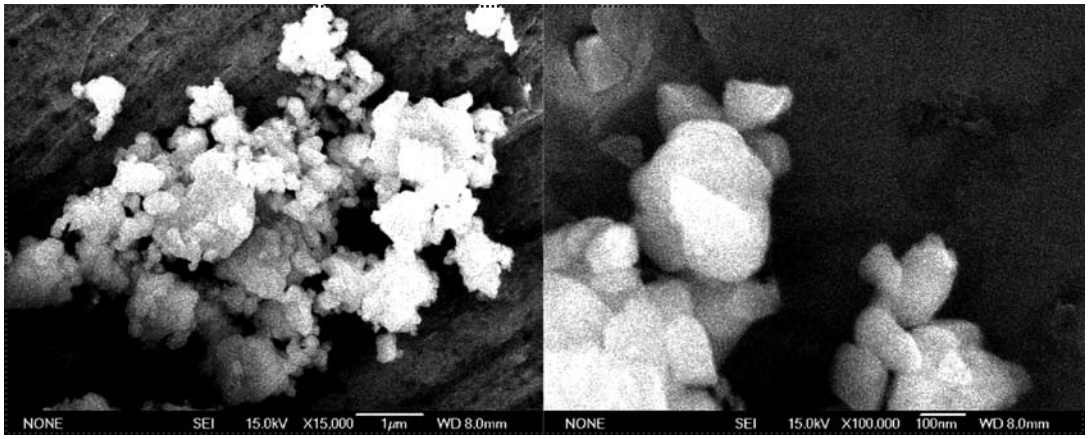


Рис. 2. Электронно-микроскопические снимки наноструктурного порошка состава 2, полученного методом химического соосаждения

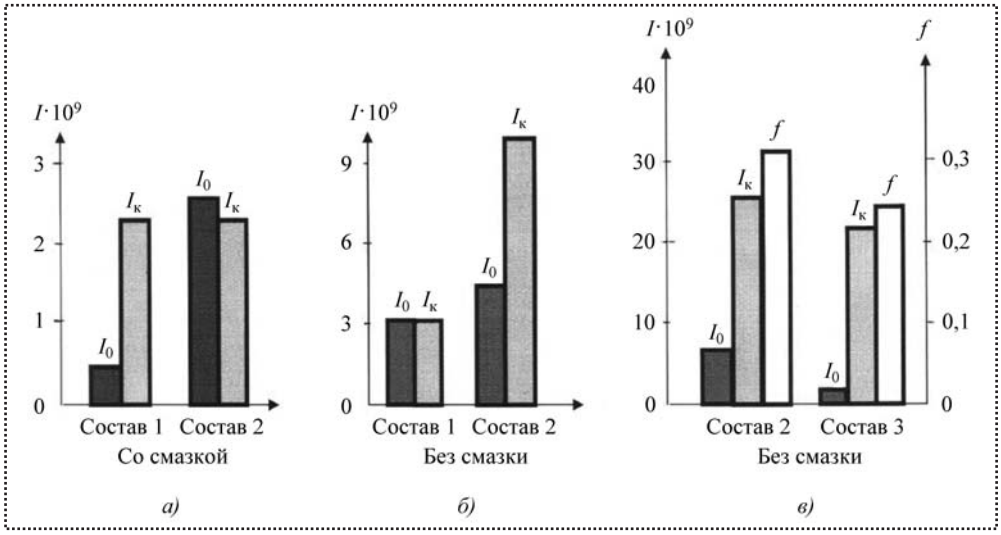


Рис. 3. Интенсивности изнашивания образцов I_o из керамик составов 1–3 и контробразцов $I_к$ из сталей ШХ15 и У10А:
а – при реверсивном движении в паре со смазкой солидолом С; *б* – без смазки; *в* – при поступательном движении без смазки

На рис. 3 приведены характеристики износостойкости образцов керамик ЧСЦ, полученных из наноструктурных порошков, при различных условиях испытаний.

Из данных рис. 3 видно, что износостойкость керамических образцов зависит от их состава. При реверсивном движении и работе со смазкой (рис. 3, *а*) интенсивность изнашивания образцов I_o из диоксида циркония с добавлением Al_2O_3 (состав 1) снижается в 4,4 раза по сравнению со значением интенсивности изнашивания керамики, в состав которой добавлен только Y_2O_3 (состав 2), со значения $I_o = 2{,}44 \cdot 10^{-9}$ до $I_o = 0{,}55 \cdot 10^{-9}$. Контробразцы работают с одними и теми же значениями интенсивностей изнашивания $I_к = 2{,}2 \cdot 10^{-9}$. При работе без смазки (рис. 3, *б*) снижение I_o достигает 1,4 раза со значения $I_o = 4{,}6 \cdot 10^{-9}$ при добавлении Y_2O_3 до $I_o = 3{,}3 \cdot 10^{-9}$ при добавлении Al_2O_3. При этом в три раза повышается износостойкость контробразцов из стали ШХ15.

Следует отметить, что при работе пар трения с керамиками составов 1 и 2 всухую значительно снижаются триботехнические характеристики по сравнению с их работой при наличии смазки: износостойкость керамики снижается от двух до шести раз, контробразцов из стали высокой твердости – от 1,5 до 4 раз, причем при добавлении Al_2O_3 снижение триботехнических характеристик меньше, а при добавлении Y_2O_3 – больше.

При поступательном движении без смазки (рис. 3, *в*) среднее значение интенсивности изнашивания образцов I_o из диоксида циркония с добавлением Y_2O_3 и Al_2O_3 (состав 3) по испытаниям в различных условиях нагружения при pv = 10 МПа·м/с снижается в 6 раз по сравнению со значением интенсивности изнашивания керамики, в состав которой добавлен только Y_2O_3 (состав 2), со значения $I_o = 6{,}58 \cdot 10^{-9}$ до $I_o = 1{,}09 \cdot 10^{-9}$. Контробразцы работают с близкими значениями интенсивностей изнашивания: $I_к = 21{,}7 \cdot 10^{-9}$ с керамикой состава 3 и $I_к = 24{,}9 \cdot 10^{-9}$ с керамикой состава 2. Коэффициенты трения в парах с керамикой состава 3 снизились по сравнению с парами с керамикой состава 2 в 1,4 раза со значения $f = 0{,}3$ до значения $f = 0{,}22$.

Выводы

Исследование износостойкости керамик с различными оксидными добавками составов:

1. $ZrO_2 + Al_2O_3$;
2. ZrO_2 + 6 % мол. Y_2O_3;
3. ZrO_2 + 6 % мол. $Y_2O_3 + Al_2O_3$

показало, что наличие в составе добавки Al_2O_3 приводит к улучшению их триботехнических характеристик независимо от условий испытаний, что необходимо учитывать при применении в различных узлах трения кера-

мика–металл и в качестве волочильного инструмента при волочении проволоки в кабельной промышленности.

Библиографический список

1. **Sherman D., Brandon D.** Mechanical Properties of Hard Materials and Their Relation to Microstructure // Advanced Engineering Materials, 1999, V. 1. no. 3–4. P. 161–181.

2. **Kerkwijk B., Mulder E., Verweij H.** Zirconia-Alumina Ceramic Composites with Extremely High Wear Resistance // Advanced Engineering Materials, 1999. V. 1. no. 1. P. 69–70.

3. **Тонкая техническая керамика** / Под ред. Х. Янагида; пер. с японского – М.: Металлургия, 1986. 278 с.

4. **Караулов А.Г., Гальченко Т.Г., Чуднова Н.М. и др.** Керамика на основе диоксида циркония для волочильного инструмента // Огнеупоры и техническая керамика. 1996. № 5. С. 14–20.

5. **Jakushkina V.S., Korableva E.A., Dyachenko O.P. et al**. Zirconia-based ceramics on the way to the production process // Advanced ceramics for third millennium. Proceedings of the International Conference held in Kiev 5–9 November 2001. Krakov. 2002. Vol. 69. P. 75–76.

6. **Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Алисин В.В. и др.** Исследование изнашивания керамики, полученной из наноструктурных порошков ЧСЦ // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2009. № 11. С. 42–48.

7. **Методы испытаний на трение и износ:** справочное изд. / Л.И. Куксенова, В.Г. Лаптева, А.Г. Колмаков, Л.М. Рыбакова. М.: "Интермет Инжиниринг", 2001. 152 с. (Специалист-материаловед).

8. **Бакунов В.С., Беляков А.В.** Прочность и структура керамики // Огнеупоры и техническая керамика. 1998. № 3. С. 10–15.

Контактные координаты авторов

Валентина Григорьевна Лаптева – vglapteva@mail.ru
Валерий Васильевич Алисин – vva-imash@yandex.ru.
Лидия Ивановна Куксенова – lkukc@mail.ru.

УДК 621.9.079

В.Ф. Гологан, *д-р техн. наук,* **В.В. Туртыгин, Т.В. Туртыгина, П.Е. Цыкиновский,** *канд-ты техн. наук (Институт прикладной физики АН Молдовы)*

Разработка и исследование металлоплакирующих СОЖ[1]

Для повышения эффективности процесса обработки труднообрабатываемых материалов (аустенитных сталей, титановых сплавов и др.) целесообразно применять рабочие жидкости на основе комплексных соединений, обеспечивающих непрерывную генерацию металлических пленок в зоне контакта, у которых центральными атомами являются мягкие металлы (медь, цинк).

With the purpose to increase the effectiveness of difficultly processed materials processing process (austenitic steels, titanic alloys, etc.) there are sufficient reasons to apply working liquids on the basis of the complex combinations, providing the continuous generation of metal films in the zone of contact, in which the central atom is the soft metal (cooper, zinc).

Ключевые слова: металлоплакирующие СОЖ, комплексное соединение, износ, стойкость инструмента.

Key words: metal plating lubrication-cooling liquids, complex compound, wear, tool life.

При обработке резанием труднообрабатываемых материалов (аустенитных сталей, титановых сплавов), происходит разрушение лезвия инструментов из-за скалывания в результате схватывания (сваривания) контактирующих поверхностей. Эффективное влияние на работоспособность режущего инструмента могут оказать образующиеся на рабочих поверхностях мягкие металлические пленки, защитное действие которых обеспечивается за счет разделения контактирующих поверхностей сопряжения инструмент – обрабатываемый материал, поскольку они сохраняют работоспособность в широком диапазоне температур и давлений и обеспечивают хорошее прилегание контактирующих поверхностей, для исключения высоких локальных давлений [1–5].

Перспективный метод получения пленок мягких металлов – это формирование их из комплексных, металлоорганических и других соединений, в которых мягкий металл находится в химически связанном состоянии [3–5].

Возможность использования координационных соединений в качестве носителей различных металлов, пленки которых, будучи высажены на контактирующие поверхности, облегчают процессы трения и резания.

Известно два способа применения комплексных соединений в процессе трения и резания металлов [4–6]:

– введение лигандов в смазочную композицию лигандов, образующих в процессе трения комплексы с материалом трущихся поверхностей;

– применение комплексных соединений непосредственно в качестве присадок.

Комплексные соединения дают возможность оказывать определенное функциональное действие на обрабатываемую поверхность направленным подбором лигандов, содержащих элементы (Cl, S, P), оказывающие благоприятное влияние на процесс трения и резания [3, 7]. В смешанных координационных соединениях взаимное влияние таких лигандов приводит к определенным изменениям в структурных характеристиках комплексов и их термодинамических параметрах (устойчивости комплекса, теплоты образования) и кинематических характеристиках (констант скорости реакции диссоциации, энергии активации).

[1]Материалы научно-технической конференции "Трибология – машиностроению" (2010).

Во втором варианте за счет изменения термодинамических характеристик комплексов можно регулировать интенсивность формирования пленки в процессе резания, которая, видимо, может осаждаться как в результате термического разложения комплекса, так и под действием гальванических токов, возникающих в контакте инструмент – обрабатываемая деталь.

Для разработки металлоплакирующей СОЖ в качестве центральных атомов выбраны мягкие металлы медь и цинк, проявляющие заметную тенденцию к комплексообразованию с обширным числом различных атомов-доноров: кислородом, азотом, серой, галогенами, фосфором, углеродом.

Так как лиганды должны обладать хорошими смазочными и противозадирными свойствами, то в качестве основного был выбран триполифосфат (ТПФ), который образует комплексы с Cu и Zn, и они хорошо изучены. Для этих металлов в качестве дополнительных лигандов могут быть применены аммиак, этаноламины, амфатические амины [7]. Сочетание триполифосфатов и аминов в одной координационной сфере позволяет получать смешанные комплексы с различными характеристиками, обеспечивающими образование антифрикционной пленки только в местах контакта трущихся поверхностей.

Смазочные свойства разработанных СОЖ различного состава оценивали на стандартной четырехшариковой машине (ГОСТ 9490–75) при ступенчатом повышении нагрузки на узел трения с использованием стандартных шаров из стали ШХ15 диаметром 12,7 мм [5]. Для изучения процесса комплексообразования применяли спектрофотометрический и потенциометрический методы. Измерение спектров поглощения производили на спектрофотометрах Specord и VSU-2P в одно- и пятисантиметровых кюветах при исследовании соответственно, видимой и ультрафиолетовой частей спектра.

Измерение потенциалов проводили с помощью потенциометра Р-363-1, электродом сравнения в котором служил насыщенный каломельный полуэлемент. Диффузионные потенциалы элиминировали солевыми мостиками, заполненными насыщенными растворами KCl. В качестве рабочих электродов применяли: при изучении комплексов цинка – амальгама цинка, при изучении комплексов меди – медные электроды. Амальгама цинка готовилась электролитически. Поверхность медного электрода периодически обновляли путем электролитического осаждения меди из кислого электролита меднения. Для приготовления растворов использовали реактивы марок "ЧДА", "ХЧ" и "Ч".

Уровень качества СОЖ оценивали по соответствию функциональным, эксплуатационным и санитарным требованиям. Стойкостные испытания проводились при сверлении и точении коррозионно-стойких сталей 12Х18Н10Т и 20Х13. Поверхности трения изучали при помощи микроанализатора MS-46 и сканирующего электронного микроскопа "Стереоскан-150". Силы резания измеряли универсальным динамометром УДМ-600.

Поскольку авторы придерживаются мнения, что металлические пленки на поверхности в основном формируются под влиянием электрических токов в электролитах и температурных вспышек, разлагающих водные среды, были также исследованы неводные среды, образующие комплексы (моно- и триэтаноламинные), в которых фактор электрокристаллизации практически исключен.

Проведенные трибологические исследования показали, что триэтаноламины обладают хорошими смазочными свойствами при низких нагрузках. Однако по мере увеличения нагрузки наблюдался переход к заеданию трущихся тел, характеризуемому неравномерным скольжением трущихся поверхностей, увеличением размеров пятен износа и, в конечном счете, свариванием шаров (рис. 1). При введении в смазочную среду комплексов меди и

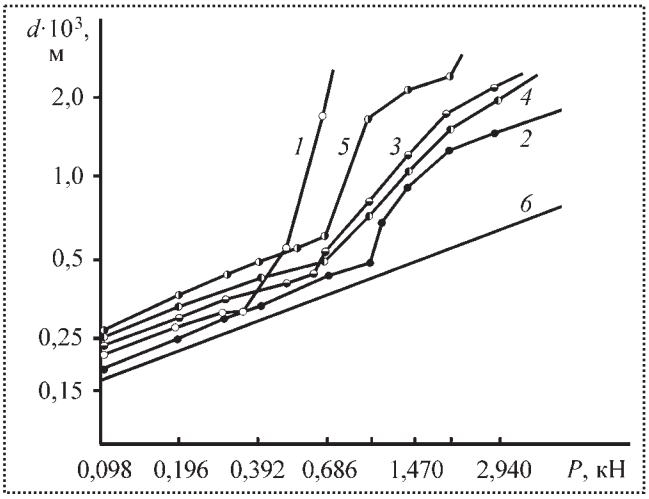


Рис. 1. Зависимость диаметра пятна износа от осевой нагрузки при составах смазочной среды:
1 – триэтаноламин; *2* – триэтаноламин + комплекс меди; *3* – триэтаноламин (чистый) + 10 % комплекса меди; *4* – триэтаноламин (чистый) + 20 % комплекса меди; *5* – триэтаноламин (чистый) + 10 % комплекса кадмия; *6* – линия упругой деформации шаров по Герцу

кадмия диапазон нагрузок до наступления сваривания увеличивался практически в два раза. В то же время, износ при нагрузках, меньших чем нагрузки заедания и сваривания, при этом повышался. Ухудшение противоизносных свойств исследуемых композиций при низких нагрузках с повышением концентрации комплексов, видимо, связано с влиянием увеличения объемной вязкости на адсорбционные свойства триэтаноламина. Наличие комплексов меди и кадмия способствовало повышению нагрузки сваривания.

Вместе с тем в диапазоне заедания износ был высоким и смазывание, видимо, обеспечивалось образованием металлических пленок в контакте. Лучшими смазочными свойствами, как показал эксперимент, обладали комплексы меди. В приведенных опытах с техническим триэтаноламином с добавками комплексов меди наблюдалось расширение области нормального изнашивания, т.е. уменьшались диаметры пятен износа, что, видимо, связано с содержанием в нем ряда аминоспиртов, и он не полностью был обезвожен. В этом случае возможен электрический разряд металла на поверхностях трения, поскольку в опытах с водными растворами полифосфатов натрия при неравномерном скольжении в момент возрастания силы трения значительно увеличивались триботоки.

При испытании моноэтаноламиновых комплексов меди получены аналогичные закономерности в зоне низких нагрузок. Однако с повышением осевой нагрузки износ шаров резко возрастал до наступления сваривания.

Комплексы меди при жестких условиях испытания обеспечивали хорошее смазывание до наступления сваривания, что, видимо, связано с возрастанием объемной температуры среды, вызывающей разрушение комплексов и высаживание соответствующего металла на рабочих поверхностях. Повышение смазочных свойств моноэтаноламина в присутствии низкотемпературных комплексов меди говорит о том, что процесс формирования металлической пленки более продолжителен по сравнению со скоростью протекания химической реакции.

В опытах с чистым триполифосфатом натрия, как и с аминоспиртами, при неравномерном скольжении увеличивались диаметры пятен износа, а с увеличением концентрации комплекса улучшалось смазывание благодаря химическому взаимодействию водных растворов с металлом (рис. 2). Об этом свидетельствует характер кривых износа шаров. Если при испытании чистого триполифосфата натрия установлен перегиб кривой при переходе от нормального скольжения к прерывистому, то в присутствии комплексов закономерность изменения износа шаров в зависимости от нагрузки была близкой к линейной и, кроме того, улучшались противозадирные свойства раствора и уменьшался износ шаров на высоких ступенях нагружения. При высоких давлениях и температурах для всех концентраций комплекса наблюдался синергизм смазочного действия при трении пленки мягкого металла и триполифосфата натрия.

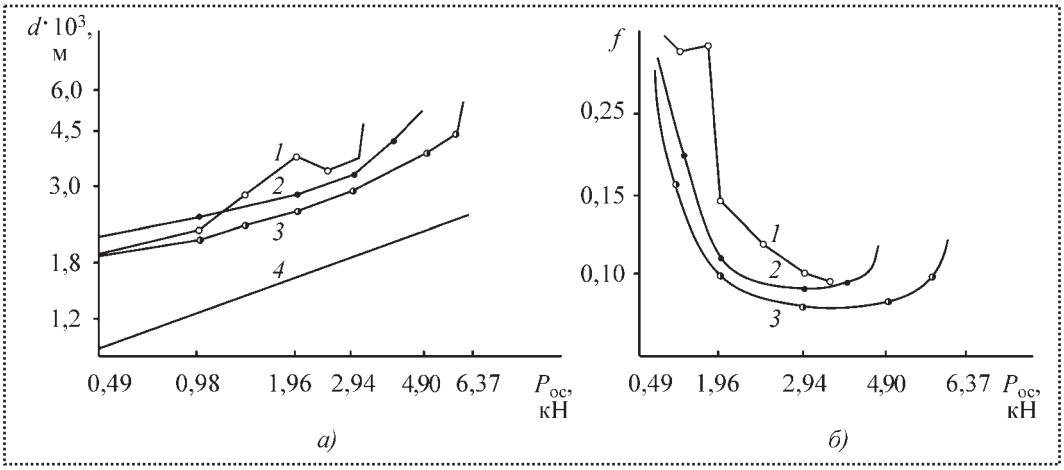


Рис. 2. Зависимость диаметра пятна износа (*а*) и коэффициента трения (*б*) от осевой нагрузки:
1 – в 2,5%-ном растворе триполифосфата натрия; *2* – с 10 % комплекса меди; *3* – с 20 % комплекса меди; *4* – линия упругой деформации шаров по Герцу

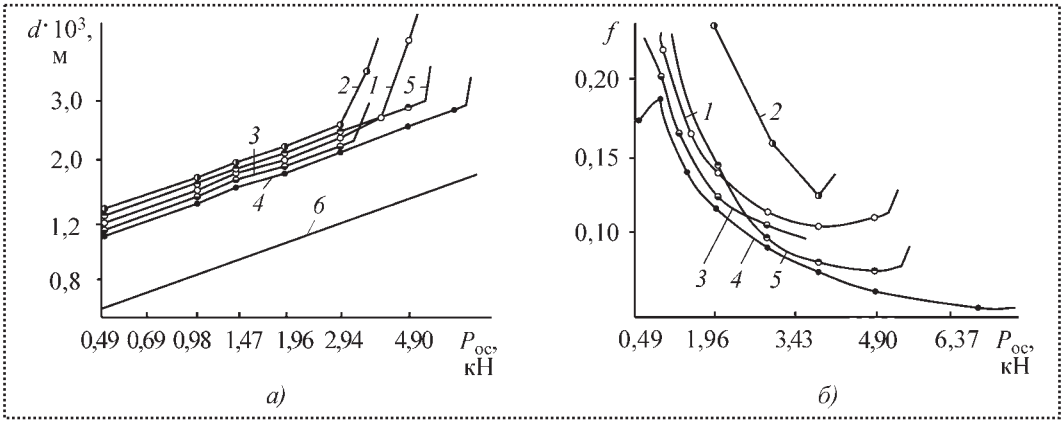


Рис. 3. Зависимость диаметра пятна износа (*а*) и коэффициента трения (*б*) от осевой нагрузки при составах смазочной среды:
1 – триполифосфат натрия технический + хлорид меди; *2* – триполифосфат технический + нитрат меди; *3* – триполифосфат технический + ацетат меди; *4* – триполифосфат технический + сульфат меди; *5* – триполифосфат натрия технический + фосфат меди; *6* – линия упругой деформации шаров по Герцу

Технический триполифосфат натрия (2,5 %) значительно улучшал смазочную способность композиции при всех условиях нагружения в присутствии комплексов меди, цинка, кадмия, железа и др. Наиболее высокий смазочный эффект наблюдался при двукратном избытке триполифосфата натрия по сравнению с концентрацией комплексообразователя (табл. 1).

1. Íàãðóçêè ñâàðèâàíèÿ ïî ÃÎ ÑÒ 9690–75 ïðè èñïûòàíèè èññëåäóåìûõ ñìàçî÷íûõ êîìïîçèöèé

Композиция	P_c, Н
ТПФ	3920
ТПФ + $CdSO_4$	6860
ТПФ + $CuSO_4$	7840
ТПФ + $ZnSO_4$	5880
ТПФ + $Cr_2(SO_4)_3$	4900
ТПФ + $FeSO_4$	5880
ТПФ + $Ti_2(SO_4)_3$	4900
ТПФ + $CoSO_4$	4900

Как видно из таблицы, лучшие противозадирные свойства обеспечивает раствор, содержащий комплексы меди.

Для определения влияния внешней сферы были выбраны растворы, содержащие триполифосфатный комплекс меди, у которого изменялась внешняя сфера, а следовательно, и температура разложения (рис. 3). Триполифосфатные комплексы меди, во внешней сфере которых находились NO_3^- и Cl^-, менее устойчивые с повышением температуры, распадались к концу опыта на предельных нагрузках, однако сваривание шаров происходило при различных нагрузках. Комплексы, содержащие ацетат во внешней сфере, устой-

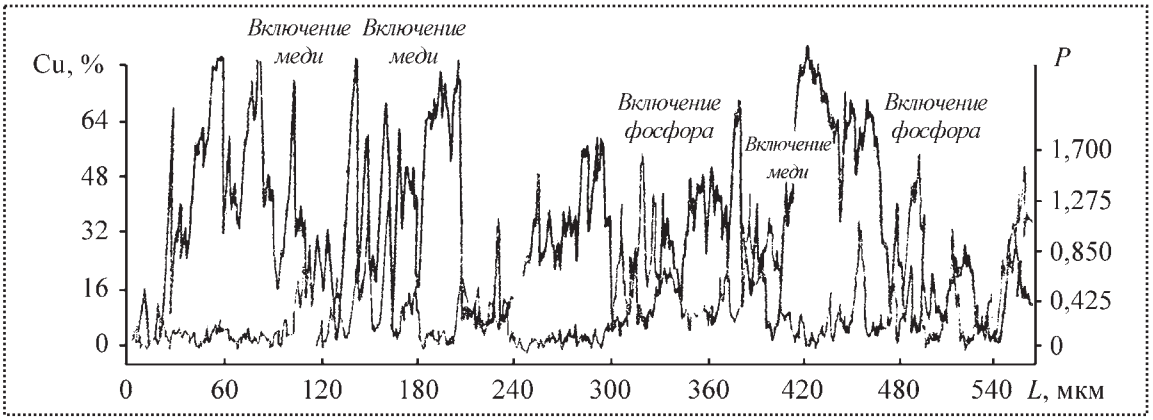


Рис. 4. Содержание меди и фосфора в поверхностном слое пятен износа

чивы по смазочным свойствам, они не уступали системе сульфат меди – триполифосфат натрия – вода, но предельная нагрузка в диапазоне смазывания была меньшей. Микрорентгеноспектральный анализ пятен износа шаров, испытанных в системе сульфат меди – триполифосфат натрия – вода показал наличие пленки меди, а в местах несплошной медной пленки происходило усиленное фосфатирование (рис. 4).

По результатам оценки противоизносной и противозадирной способности триполифосфатных систем трудно объяснить разницу в противозадирных свойствах триполифосфатных комплексов меди и цинка. Известно, что медь стимулирует коррозию за счет гальванического эффекта, а цинк пассивирует железо. Такими же электрохимическими свойствами, как у цинка, обладает кадмий, однако, противозадирные свойства его растворов были высокие (см. табл. 1). Учитывая, что выделение цинка из триполифосфатных растворов, как из пирофосфатных, сопровождалось значительными затруднениями, то облегчение разряда цинка можно достигнуть введением в систему аммиака. В связи с этим, испытаниям подвергались водные системы аммиак – сульфат цинка – пирофосфат натрия и аммиак – сульфат цинка – триполифосфат натрия.

В системе аммиак – сульфат цинка – триполифосфат натрия обнаружено образование смешанных комплексов. Вероятно в этой системе разряду металла предшествует диссоциация на простые комплексы, и цинк на поверхности разряжается преимущественно из аммиакатных комплексов, что способствует повышению нагрузки сваривания на 1960 Н по сравнению с системой сульфат цинка – триполифосфат натрия – вода.

Таким образом, формирование металлических пленок на поверхностях трения в неводных системах, по нашему мнению, в основном, осуществляется в результате температурного разложения комплексов. Этот процесс относительно медленный и не соизмерим со скоростью протекания химической реакции. В водных системах на формирование поверхностной пленки может оказывать влияние также электрохимический разряд металла на поверхности контакта.

Приведенные результаты исследований показали, что в качестве основы может быть выбрана система, содержащая триполифосфат натрия и мягкий металл (Cu, Zn), обладающий хорошей противозадирной способностью. Смазочные свойства значительно улучшаются за счет комплексообразования. Концентрация триполифосфата в СОЖ выбиралась из условий его растворимости при 273 К, которая была ограничена до 25 г/л. Для выбранных концентраций был определен диапазон pH, в котором триполифосфат пассивирует железо (рис. 5, 6). Оценивали защитные свойства растворов при измерении потенциалов относительно электродов из стали Ст3, пассивирующие свойства трипо-

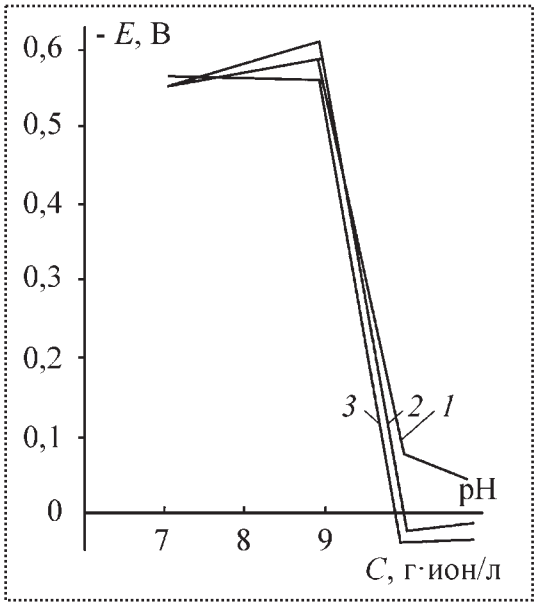


Рис. 5. Зависимость электродного потенциала стали Ст3 от pH раствора триполифосфата натрия. Концентрация, моль/л:
1 – $2{,}1\cdot10^{-2}$; *2* – $6{,}3\cdot10^{-2}$; *3* – 0,1

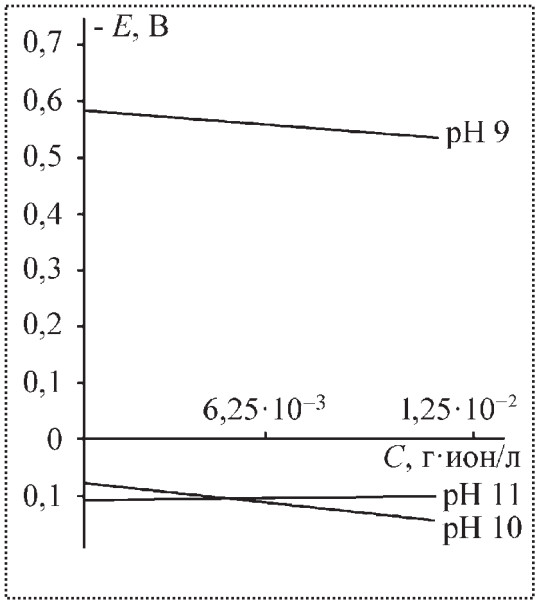


Рис. 6. Зависимость электродного потенциала стали Ст3 в триполифосфатном растворе от концентрации *C* меди

лифосфата натрия проявлялись в присутствии комплексов меди. Изменение содержания меди незначительно сказывалось на величине электродного потенциала. Защитные свойства определялись в основном величиной pH.

При низких значениях pH связывание ионов меди в триполифосфатные комплексы происходит не полностью и в результате наличия свободных ионов меди наблюдается химическое меднение поверхности, что приводит к осаждению некачественных медных пленок. При pH 10 образуются довольно прочные триполифосфатные комплексы меди, из которых медь осаждается под влиянием высоких температур и давлений. Этот комплекс существует только в растворе, а потому систему ТПФ + $CuSO_4{\cdot}5H_2O$ использовать в СОЖ без дополнительного лиганда невозможно и, кроме того, при испарении воды образуются твердые солевые отложения, которые тяжело отделяются от металлических поверхностей. Поэтому изыскивались органические вещества, способные образовывать с ионами меди комплексы, увеличивающие период загущения растворов и предотвращающие выпадение твердых солевых отложений. Многоатомные спирты, сульфонаты щелочных металлов, амины и аминоспирты, неионогенные ПАВ вводились в триполифосфатные растворы, максимальная концентрация была 1 %.

Выполненные исследования показали, что в случае применения триэтаноламина учитывался период загущения растворов в зависимости от его концентрации до 24 ч и на поверхности металлических пластинок образовывалась тонкая эластичная пленка, легко удаляемая влажным тампоном. В тройных системах в зависимости от pH образовывались простые триполифосфатные, смешанные или простые триэтаноламиновые комплексы. При pH 10 меднение происходило только на пятнах износа и для концентраций меди, соответствующих связыванию триэтаноламина в комплекс, установлено наименьшее понижение нагрузки сваривания по сравнению с системой ТПФ + $CuSO_4{\cdot}5H_2O$.

Видимо, такие экспериментальные результаты связаны с тем, что амины, адсорбируясь на поверхности трения, препятствуют разряду

комплексного иона триполифосфата меди. Комплексообразование снижает адсорбционную способность аминов и в этом случае они являются носителями металла в зону контакта, где разрушаются под действием температуры и давления, и в результате действия токов происходит меднение поверхности трения.

Был проведен комплекс испытаний триполифосфатных систем с моноэтаноламином, в котором для связывания меди в комплекс необходимо ввести в 2,45 раза (по массе) меньше, чем триэтаноламина. На основе коррозионных испытаний содержание триэтаноламина выбрано 7 г/л, а по результатам испытаний на задир – содержание сульфата меди установлено 4,4...6 г/л.

Таким образом, в качестве третьего компонента СОЖ был выбран лиганд, образующий с ионами меди устойчивые комплексы, предотвращающий химическое меднение металлических поверхностей в обычных или стационарных условиях, предотвращающий выделение твердых солевых отложений, не мешающий проявлениям синергизма в смазочном действии пленки меди и триполифосфата натрия. Аналогичным образом поступали и при исследовании СОЖ, содержащих цинк, на основе которых был определен следующий состав: триполифосфат натрия технический – 2,0; $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0,08; $NH_4 \cdot H_2PO_4$ – 0,1; моноэтаноламин – 0,4...0,5; $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ – 0,005...0,01.

Оценка эффективности смазочных сред для резания металлов обычно проводится на основе результатов стойкостных испытаний, проведенных в конкретных условиях металлообработки [7]. В данном исследовании обрабатывали стали 12Х18Н10Т и 20Х13 при сверлении и точении. Сверление проводилось сверлами из стали Р6М5 одной плавки диаметром 9,5 мм на станке 2Б125 с бесступенчатым регулированием скорости резания и расходом жидкости 8 л/мин. Объектами сравнения служили рекомендуемая йодсодержащая РЗ-СОЖ 8 и стандартная 5%-ная эмульсия эмульсола Т. На основе предварительных исследований стойкостные испытания проводились при условиях, указанных в табл. 2.

Исследования показали, что средняя стойкость сверл при использовании разработанной СОЖ в 4 раза выше, чем с применением РЗ-СОЖ 8 и в 6–7 раз выше, чем при подаче стандартной 5%-ной эмульсии эмульсола Т. Кроме того, производительность процесса повысилась на 30 и 49 % соответственно.

При анализе влияния СОЖ на процесс сверления можно отметить, что фосфотирование никельсодержащих сталей происходит более интенсивно и это способствует повышению твердости образованного микрорельефа и увеличению нормального износа режущего инструмента, а формирование медной

2. Ñòîéêîñòü ñâåðë ïðè èñïûòàíèè ÑÎ Æ

Смазочно-охлаждающая жидкость	Обрабатываемый материал	Количество испытанных сверл	Скорость резания, м/мин	Подача, мм/мин	Средняя стойкость сверл, мин
ТПФ – 2,5 %; сульфат меди – 0,6 %; ТЭА – 0,5 %; вода до 100 %	12Х18Н10Т	5	14,6	43	150
То же	12Х18Н10Т	5	19,1	63	173
>>	20Х13	10	25	83	140,3
РЗ-СОЖ 8	12Х18Н10Т	5	14,6	43	35,7
РЗ-СОЖ 8	20Х13	10	19	63	67,8
Стандартная 5%-ная эмульсия (ЭТ-2)	12Х18Н10Т	5	12,8	33	22,4

пленки на поверхности инструмента приводит к замедлению этого процесса. Осаждение пленки на инструменте, видимо, вызвано электрическими токами, сопутствующими процессу резания, так как сверло является катодом в произвольно образующейся "гальванической ванне". В связи с тем, что пленка образуется по всей глубине сверления, она участвует также и в теплоотводе. Наиболее вероятно, что триэтаноламин возгонялся в более холодные объемы жидкости и не участвовал в процессе смазывания. На передней поверхности сверла из-за высокой плотности контакта образовывался нарост, защищающий ее от истирания.

В этих опытах условия смазывания и образования медной пленки были не столь благоприятны из-за низкой температуры в зоне резания и незначительного концентрирования продуктов разложения СОЖ. Ужесточению режимов не препятствовала ограниченная прочность сверл, однако даже в выбранных условиях резания применение исследуемой СОЖ эффективно при сверлении вязких сталей. Химическое модифицирование и формирование в контакте пленки мягкого металла способствует значительному повышению стойкости инструмента за счет уменьшения повреждаемости режущих лезвий.

Аналогичные результаты получены и при точении стали 13Х18Н10Т. Опыты показали, что в случае подачи рекомендованных СОЖ целесообразно применение пластинок Т15К6 вместо ВК-8: при этом режимы резания были повышены в 2–3 раза, и стойкость инструмента возросла в 4 раза по сравнению с условиями обработки с применением 5 % эмульсии из эмульсола "Т" [8].

Заключение

Таким образом, СОЖ, содержащие комплексные соединения металлов, обладают хорошими противозадирными свойствами, но не обеспечивают эффективного смазывания при низких нагрузках. Для предотвращения значительного износа по задним поверхностям инструментов необходимо ужесточение в 2–3 раза режимов резания. Поэтому была поставлена задача на базе выполненных исследований разработать ряд универсальных СОЖ (эмульсолов), которые сочетали бы хорошие противоизносные свойства с хорошими противозадирными за счет избирательного осаждения пленок металлов на инструменте.

При участии ряда организаций были разработаны смазочные композиции и организован промышленный выпуск ряда новых эмульсолов под товарными названиями Морякол-1, ИФХАНОЛ-2Т и Морякол 1Л. Эти СОЖ обеспечивают уменьшение износа инструментов как при низких режимах резания, так и при их увеличении в 1,5–2 раза по сравнению с традиционно применяемыми [8].

Библиографический список

1. **Санин П.И.** Химические аспекты граничной смазки (химическое модифицирование поверхностей трения) // Трение и износ, 1980. Т. 1. № 1. С. 45–57.

2. **Гаркунов Д.Н.** Триботехника. М.: Машиностроение, 1985. С. 268–319.

3. **Буяновский И.А.** Граничная смазка адсорбционным слоем // Трение и износ, 2010. Т. 31. № 1. С. 48–67.

4. **Кужаров А.С., Фисенко О.В.** Влияние медьсодержащих добавок на триботехнические свойства пластичной смазки ЦИАТИМ-201 // Трение и износ, 1992. Т. 13. № 2. С. 317–323.

5. **Гологан В.Ф., Туртыгин В.В., Туртыгина Т.В., Цыкиновский П.Е.** Смазочные материалы на основе комплексных соединений металлов // Вестник машиностроения, 1982. № 1. С. 44–46.

6. **Усачев В.В., Погодаев Л.И., Телух Д.М., Кузьмин В.Н.** Введение в проблему использования природных слоистых геомодификаторов в трибосопряжениях // Трение и смазка в машинах и механизмах, 2010. № 1. С. 36–42.

7. **Латышев В.Н.** Повышение эффективности СОЖ. М.: Машиностроение, 1985. С. 4–33.

8. **Гологан В., Туртыгин В., Софроний Н.** СОЖ на основе комплексных соединений металлов // Tehnologii moderne. Calitate. Restructurare. Chishinau: Tehnica-INFO, 1995. Vol. 2. P. 291–293.

Контактные координаты автора

Гологан Виорел Филиппович – e-mail: vgologan@gmail.com

РАСЧЕТ, КОНСТРУИРОВАНИЕ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

УДК 620.621

Д.Г. Громаковский, *д-р техн. наук (Самарский государственный технический университет),*
М.В. Макарьянц, С.И. Ткаченко *("ЦСКБ-Прогресс", г. Самара)*

Особенности системного обеспечения работоспособности узлов трения космической техники

Рассмотрены системные факторы, отражающие специфику проблем обеспечения работоспособности узлов трения в условиях космоса.

К основным объектам анализа отнесены особенности устройства приводов – источников движения; характер их быстродействия; вопросы стабильности и величины трения; специфика применяемых материалов, а также ряд способов, разрабатываемых авторами для применения на изделиях ГНП РКЦ "ЦСКБ-Прогресс".

The system factors reflecting specificity of problems of maintenance are considered working capacity of knots of a friction in the conditions of space.

Features of the device of drives are carried to the basic objects of the analysis – movement sources; character of their speed, questions of stability and friction size, specificity of applied materials, and also a number of the ways developed by authors for application on products of "CSDB-Progress".

Ключевые слова: космическая техника, узлы трения, стабильность сил трения, агрессивность и ионизирующее действие среды, радиация, отсутствие смазки, наноразмерные фторсодержащие пленки, мультисмазка, молекулярное армирование, склерометрия.

Key words: the space technics, friction knots, stability of forces of a friction, aggression and ionising action of environment, radiation, absence of greasing, the nanosized fluorinecontaining films, multigreasing, molecular reinforcing, sklerometriya.

Космическая техника – средства выведения на орбиту и автоматические искусственные спутники Земли – включает большое количество узлов трения различного назначения [1–4]. Условия эксплуатации этой техники предъявляют особо высокие требования к их надежности и живучести, что связано с механическими перегрузками, многократно превышающими земное притяжение, влиянием невесомости, широким диапазоном температур от криогенных до 200...300 °С, давлений от сотен атмосфер до глубокого вакуума и др. Время функционирования задается от сотых долей секунды до нескольких лет; непрерывно проявляется химическая агрессивность рабочих сред, ионизирующее воздействие среды и другие агрессивные факторы. При этом невозможно вмешиваться в работу систем, производить замену изношенных деталей, настройку и регулирование.

Механические системы и узлы трения космических аппаратов классифицируют в зависимости от исполнения привода – источника движения. Это механизмы с пневмоприводом, пружинным приводом, гидроприводом, электроприводом, комбинированным приводом и др.

Каждый привод имеет особенности быстродействия, продолжительность функционирования, использования конкретного источника энергии, имеющегося на борту изделия, что и определяет характер работы исполнительного органа механизма. По этим показателям механизмы можно разбить на несколько групп.

К механизмам первой группы относят различного рода пироклапаны, пирочеки, пирорезаки, пироболты, пирозамки, замки-толкатели и т.д., т.е. механизмы одноразового действия с максимальным быстродействием. Все эти механизмы должны иметь пирозаряд с тарированной навеской, прочную и герметичную пирокамеру с подвижным поршнем, приводящим в действие исполнительный ме-

ханизм. Основная трибологическая проблема этой группы механизмов – это необходимость снижения трения на поршне в процессе его движения, обеспечивающее наиболее полное использование энергии пирогазов и получение максимального трения в конце хода поршня, что гарантирует отсутствие отскока, который может привести к негерметичности системы.

Минимизация сил трения при движении достигается подбором материалов трущейся пары, использованием упрочнения трущихся поверхностей, антифрикционных твердых покрытий и других апробированных в отрасли методов.

Заклинивание в конце хода клапанов предотвращается конструктивными методами, выбором конусности, удалением антифрикционных покрытий на самозаклинивающихся поверхностях, введением деформируемых элементов и др.

Отработка таких технических решений требует проведения обширных доводочных испытаний и подтверждения полученных показателей надежности.

Вторая группа механизмов – многочисленные пневматические узлы и агрегаты, к которым относят дренажную, предохранительную, заправочную арматуру, газовые редукторы, пневмотолкатели и др. устройства, в которых газообразное рабочее тело воздействует на чувствительный элемент и производит перемещение исполнительного механизма. В таких механизмах потери на трение ухудшают точность работы механизмов, снижают стабильность их работы. Например, у пневматических толкателей системы раскрытия створок, развивающих усилие в несколько тонн одновременно работают четыре пневматических толкателя. Разница в усилии толкания у них не должна превышать 50 Н в интервале температур от –50 до +70 °С. При срабатывании всех пневматических толкателей от одного источника давления разница усилия толкания определяется только силами трения в поршневой системе.

Для обеспечения минимального трения в качестве уплотнения поршней использовали стандартное резиновое кольцо круглого сечения с минимальным натягом и изоляцией контактирующей поверхности кольца специальной фторопластовой манжетой толщиной 0,20...0,30 мм, что обеспечило необходимую стабильность трения.

Новых решений потребовала отработка трибохарактеристик предохранительных, дренажных клапанов и газовых редукторов, предназначенных для поддержания заданных параметров давления в газовых средах замкнутых объемов или в трубопроводах. Такие системы, обладающие подвижными массами, склонны к неустойчивости, клапаны "гудят", происходят соударения в седле, когда клапанная пара может быть разрушена, а клапан становится негерметичным. При движении контактирующих поверхностей происходит фретинг-износ, а коррозия продуктов износа заполняет зазоры, что приводит к изменению настройки клапанов или даже к полному их заклиниванию.

Механизмы третьей группы осуществляют свою работу за счет потенциальной энергии предварительно сжатых пружин. Используются как одноразовые, так и многоразовые системы с повторным взведением пружины от гидравлического или электрического приводов. Механизмы этой группы с металлическими пружинами обладают большой массой и применяются реже других. Пружинные приводы обычно выполняются с длинными пружинами для обеспечения заданной величины хода. Такие пружины менее устойчивы и при потере их устойчивости возникает трение витков о ближайшие элементы конструкции.

Более широкое использование имеют механизмы с газовой пружиной или комбинации металлических и газовых пружин. Например, дренажно-предохранительные клапаны с отдельным чувствительным элементом, управляющим газовой пружиной.

Большую группу представляют собой гидравлические механизмы, используемые в автономных рулевых машинах с собственным насосом и золотниковой парой, шестеренчатыми и лопаточными насосами, а также рулевые машины центрального питания от турбонасосных агрегатов двигательных установок.

Основными способами снижения трения в рулевых механизмах является обеспечение качества изготовления золотниковых пар и чистоты рабочей жидкости.

Высокие требования по долговечности, надежности и точности поддержания заданных параметров должны быть обеспечены при отработке гидравлических агрегатов и систем терморегулирования космических аппаратов: гидроблоков, регуляторов расходов, регуляторов-переключателей, аккумуляторов давления, гидрокомпенсаторов поршневого и сильфонного типа с металлическими и газовыми пружинами. Все они работают при смазке подшипников и трущихся пар рабочей жидкостью. Их ресурс достигает десятков тысяч часов непрерывной работы.

Для доводки систем гидравлики создаются наземные испытательные и технологические гидравлические стенды, насосные станции и подъемники-кантователи изделий. Основной проблемой, снижающей долговечность данного класса оборудования, является пульсация давления рабочих жидкостей, вызванных дискретной работой насосов и резонирование элементов систем, что приводит к преждевременному фретинг-износу исполнительных механизмов.

Последняя группа механизмов – это электроприводные механизмы. В зависимости от поставленных задач разрабатывают и применяют различные механические редукторы, начиная от простейших, с внешним зубчатым зацеплением и небольшим передаточным отношением и заканчивая сложными комбинированными системами с использованием многоступенчатых волновых зубчатых передач с передаточным отношением в десятки тысяч. В волновых зубчатых передачах используются гибкие колеса с мелкомодульными зубьями, в нашем случае высота зуба не превышает до 0,5 мм, так как при работе в зацеплении одновременно участвует несколько десятков зубьев удается передавать значительные моменты, но мелкомодульные высоконагруженные зубчатые передачи особенно чувствительны к точности изготовления и качеству смазки.

При использовании консистентных смазок продукты износа остаются во впадинах зубьев. При жидкой смазке, в условиях невесомости, продукты износа остаются на поверхностях зубьев.

Проблемы трения, износа и долговечности зубчатых колес и подшипников наиболее обострены в условиях работы на наружных поверхностях космических аппаратов.

Для обеспечения работоспособности электроприводных механизмов нашли применение магнитно-жидкостные уплотнения. Такие устройства были использованы, в частности, для герметизации вращающейся части выходного вала. Диаметр уплотняемой поверхности превышал 250 мм, момент трения при этом должен был быть минимальным. Для этих целей были непригодны даже резиновые кольца с фторопластовым напылением. Многие вопросы, возникавшие при разработке и отработке магнито-жидкостного уплотнения, были решены впервые не только в России, но и в мире.

В созданных конструкциях момент трогания не превышал 9 Н·м, а установившийся момент трения при частоте вращения до 14 об/мин – не более 7,5 Н·м, при массе узла порядка 10 кг. Конструкция более 20 лет успешно эксплуатируется на серийных космических аппаратах.

В настоящее время для обеспечения устойчивости и стабилизации фрикционных характеристик узлов трения отрабатывается ряд новых технических решений.

В их числе способ диффузионного молекулярного армирования поверхностей трения (патент РФ № 2198954). Повышенная работо-

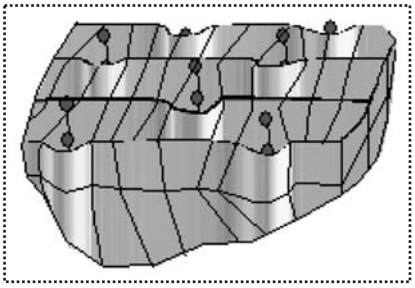


Рис. 1. Схема пассивации поверхностных дефектов

способность поверхностей в разработанном способе является следствием диффузионного внедрения наночастиц или активных органических молекул в глубь металла по выходам на поверхность дефектов кристаллической решетки. В результате обработки на поверхности образуется модифицированный (пассивный) слой, "прошитый" прочными цепочками химически связанных атомов, выполняющими роль "арматуры" в металлической решетке (рис. 1).

Методика молекулярного армирования поверхностей деталей содержит три этапа:

• на первом этапе проводят механическую обработку поверхностей, при которой в поверхностном слое детали происходит образование микродефектов, способных взаимодействовать с окружающей средой;

• на втором этапе готовят поверхности к молекулярному армированию (мойка и слабое травление);

• на третьем этапе проводят операцию молекулярного армирования. При этом детали помещают в органическую жидкость, а затем термоактивируют их при наложенной вибрации. Активированные молекулы органического вещества взаимодействуют с активированной поверхностью металла, химически связанные атомы проникают в глубь металла по линейным дефектам кристаллической решетки металлической поверхности и армируют поверхность обрабатываемой детали.

Об эффективности нового способа свидетельствует повышение активационных характеристик поверхностей (таблица) на примере обработки стали 40Х.

Для стабилизации "сухого" трения в вакууме на волновых мелкомодульных редукторах отрабатывается технология образования нано- и микроразмерных фторсодержащих антифрикционных противоизносных пленок (патенты РФ № 2017802, 2027745 и др.).

Ñðàâí èòåëüí û å äàí í û å ñòåï åí è óï ðî ÷í åí èÿ

Виды обработки	Микротвердость Нμ	Энергия активации пластической деформации, кДж / моль
ППД (накатка)	430	56
Упрочнение по технологии СВС	825	87
Упрочнение взрывом	465	60
Новый способ	495	93

Основной эффект, обеспечивающий образование фторсодержащих пленок, реализуется при обкатке редукторов за счет физико-химического взаимодействия поверхностей с микропорошками фторированного графита $(CF_x)_n$, введенными в приработочную жидкость. В зоне трения частицы расслаиваются, на поверхностях сдвига обнажаются радикалы, несущие атомы фтора, которые реагируют с металлическими поверхностями и образуют на них эластичный слой фторидов железа, отличающийся от обычной окисленной поверхности своими свойствами. Поверхности трения при этом становятся более гладкими, выдерживают большее число циклов нагружения до наступления выкрашивания, хемосорбируют смазку и отталкивают воду – источник водорода, разъедающего поверхность (рис. 2).

При применении смазок в узлах трения намечена отработка способа мультисмазки (патент РФ № 2334909) повышение адгезионных свойств смазочного слоя здесь достигается введением промежуточного подслоя между металлической поверхностью и смазкой, как показано на рис. 3.

В качестве материала подслоя подобран ряд жидкостей, обладающих высокой адгезией к металлическим поверхностям и одновременно к смазочным материалам, например,

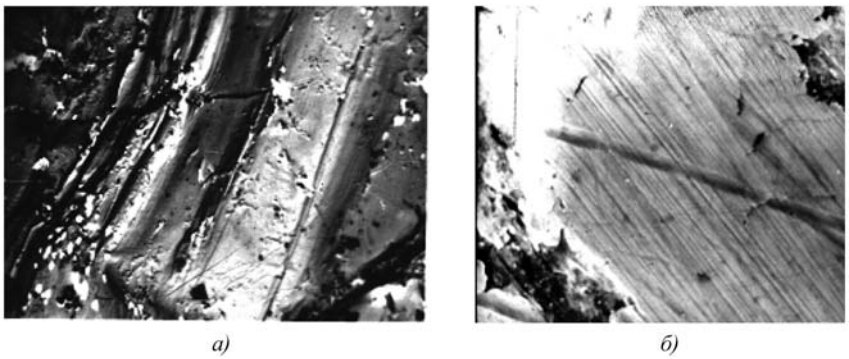


Рис. 2. Поверхности трения после приработки (×10 000):
а – в масле Индустриальное-20; *б* – в том же масле с добавкой $(CF_x)_n$

кремнийорганическая жидкость олигометилсилоксана от ПМС-500 (по ТУ 6-02-737 – 78) до ПМС-60000.

Первичную апробацию способа проводили при испытаниях подшипников качения № 6-77054 при смазке маслом ТАД-17 на стенде ВНИИПП. За время испытания (60 мин) подшипник практически не нагревался; температура оставалась на уровне комнатной (20 °С); момент трения снижался на 17,6 %; уровень шума снижался до 3,0 дБ; уровень вибрации снижался на 2...3 дБ; пятно износа (на 4-шариковой машине) уменьшилось на 30 % и более.

Обеспечение плавности перемещений в клапанных и других системах может быть получено при использовании технологии деформационного формоизменения (патенты РФ № 2138579, 2198954 и др.) на наружных

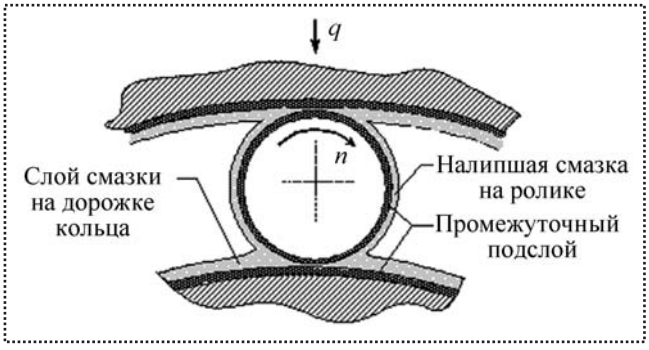


Рис. 3. Структура промежуточного подслоя смазки в роликовом подшипнике качения (способ мультисмазки):
q – нагрузка на подшипник; *n* – частота вращения

или внутренних поверхностях пар трения путем обкатки и копировании формы деформирующего инструмента.

В одной из модификаций способа после операции формообразования производят химико-термическую обработку с целью создания поверхностного слоя диффузионно-насыщенного ионорадикалами карбонофторида типа $(CF_x)_n$, при нагреве в среде инертных газов или вакууме. Температура нагрева 100...230 °С, вакуум 10^{-4} атм (рис. 4).

Вариантом способа является нанесение на формоизмененную поверхность твердосмазочного покрытия.

Важным технологическим фактором обеспечения работоспособности узлов трения космической техники является контроль соблюдения оптимальных характеристик их поверхностей.

Применяемый в производстве контроль твердости и геометрических характеристик поверхностей (точность размеров, формы и параметров шероховатости) недостаточен.

Дополнительные резервы контроля связаны с применением модернизированного способа склерометрии, что позволяет оценивать

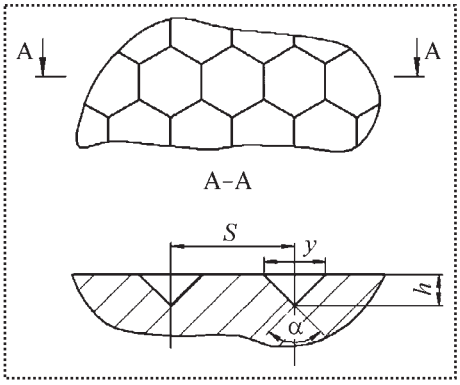


Рис. 4. Химико-термическая обработка после деформационного формоизменения поверхности трения при диффузионном насыщении поверхностного слоя:
n – глубина канавок; *y* – ширина канавок; α – угол заострения; *S* – расстояние между противоположными гранями

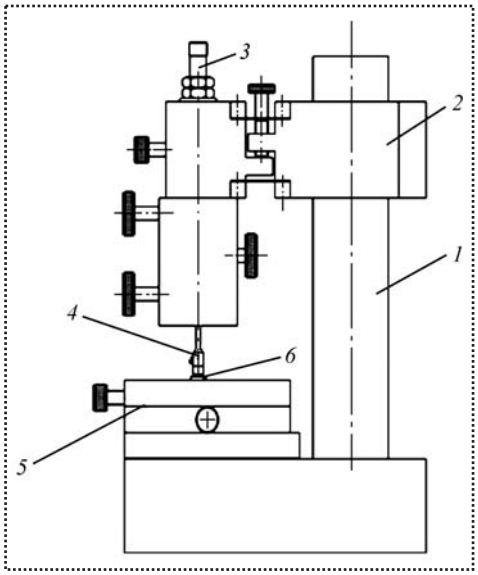


Рис. 5. Склерометрический программно-аппаратурный комплекс:
1 – базовая стойка; *2* – узел подвеса блока индентора; *3* – датчик вертикальных перемещений индентора; *4* – индентор; *5* – микрометрический столик; *6* – испытываемый образец

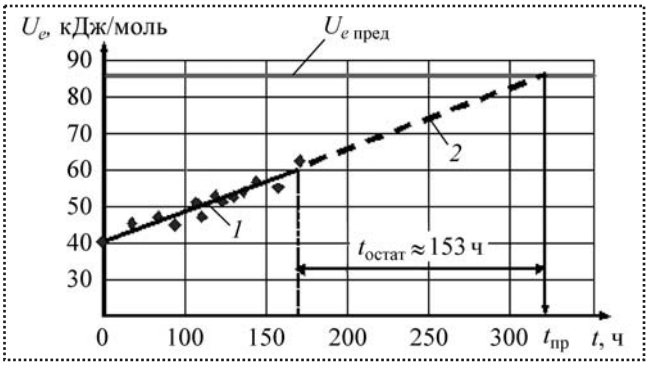


Рис. 6. Пример прогнозирования остаточного ресурса:
1 – участок графика накопления повреждаемости, построенный по экспериментальным данным; *2* – экстраполяция экспериментальных данных; $t_{пр}$ – время исчерпания остаточного ресурса; $t_{остат}$ – остаточный ресурс

деформационные характеристики материалов: энергию активации пластической деформации U_0, накопленную энергию повреждаемости U_e, структурно-чувствительный коэффициент γ.

Для оценки указанных характеристик СамГТУ (патенты РФ № 2277232, 2282174 и др.) создан склерометрический программно-аппаратурный комплекс, показанный на рис. 5.

Оценка деформационных характеристик позволяет использовать термофлуктуационные модели разрушения [5], проводить расчет износостойкости [6, 7, 8], а по экспериментальным данным накопления повреждаемости U_e ($t_{нараб}$) прогнозировать остаточный ресурс (рис. 6).

Изложенные в статье материалы, накопленный опыт и новые научно-технические разработки космической трибологии призваны обеспечить достижение функционального совершенствования механизмов и систем космической техники.

Библиографический список

1. **Наземная и аэрокосмическая трибология.** 2000: проблемы и достижения / Международная конференция Славянтрибо-5: сб. тр. ВМП АВТО-РГТА. 2000. 351 с.

2. **Кузнецов В.Д.** Физика твердого тела. М.: Полиграфиздат. 1947. Т. 4. 542 с.

3. **Крагельский И.В.** Трение и износ. М.: Машиностроение. 1968. 480 с.

4. **Решетов Д.Н.** Работоспособность и надежность деталей машин. М.: Высшая школа, 1974. 205 с.

5. **Журков С.Н.** К вопросу о физической основе прочности // Физика твердого тела. 1980. Т. 22. Вып. 11. С. 3344–3349.

6. **Громаковский Д.Г.** Концептуальный подход в задачах обеспечения высокой износостойкости поверхностей узлов трения // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2008. № 3. С. 33–37.

7. **Суслов А.Г., Шец С.П., Прудников Н.И.** Термофлуктуационная модель изнашивания поверхностей трения твердых тел при граничной смазке // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2008. № 10. С. 40–47.

8. **Громаковский Д.Г., Силаев Б.М., Логвинов Л.М.** Проблемы разработки термофлуктуационной модели изнашивания поверхностей // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2009. № 6. С. 45–48.

Контактные координаты авторов:

Громаковский Дмитрий Григорьевич – e-mail: pnms3@mail.ru
Макарьянц Михаил Викторович – e-mail: csdb@mail.samtel.ru
Ткаченко Сергей Иванович – e-mail: csdb@mail.samtel.ru

УДК 621.9

А.Г. Наумов, В.Н. Латышев, *д-ра техн. наук (Ивановский государственный университет)*

О возможности использования микрокапсулированных СОТС при лезвийном резании материалов

Представлены результаты исследований по применению в качестве внешних технологических средств магниточувствительных микрокапсулированных СОТС.

The results of investigations of possibility of application magneto sensitive microcapsulated metal working oils are presented.

Ключевые слова: резание материалов, смазочно-охлаждающие технологические средства, трибология, микрокапсулы, поверхностные явления.

Key words: cutting of metals, metal working oils, tribology, surface effects.

Микрокапсулы (МК) как носители веществ достаточно широко используются в мировой практике в таких отраслях, как химическая промышленность, медицина, сельское хозяйство с 1949 г. Анализ патентной информации за 25 лет показал (рис. 1), что из более чем 300 патентов по микрокапсулированию 10,9 % были посвящены получению фоточувствительных материалов и устройствам по их использованию, 35,7 % – красителям и тонерам для копировальной техники, 11,9 % – лекарственным, парфюмерным и медицинским препаратам, 5,2 % – получению репеллентов, фунгицидов и гербицидов для нужд сельского хозяйства.

В машиностроении основной областью использования МК являются операции обработки давлением [1]. Сведения о применении МК при резании весьма ограничены. Выявлено лишь два случая использования МК на операциях стружкоотделения [2, 3].

Причины, ограничивающие применение МК при лезвийной обработке, по-видимому, обусловлены физико-механическими характеристиками оболочек и поведением МК в СОТС в процессе резания. Так, невысокие температуры деструкции желатиновых оболочек МК (75...80 °С) не позволяют им приближаться к зоне контакта на расстояния, необходимые для эффективного действия их ядра. С другой стороны, МК, находящиеся в жидком носителе, не имеют какого-либо явно выраженного направления перемещения, а подчиняются хаотичному броуновскому движению. Это приводит к вероятностному характеру попадания МК в область, прилегающую к зоне контакта. Совокупность этих причин нивелирует эффективность применения МК в процессах механической обработки и

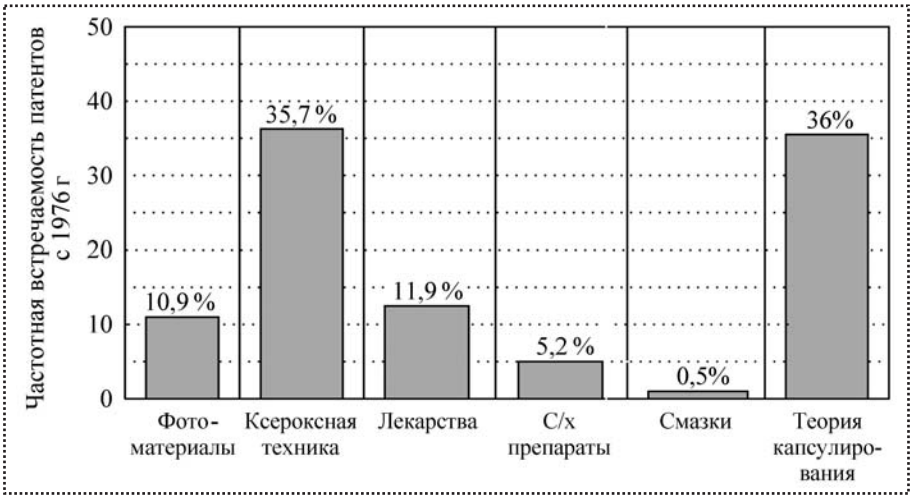


Рис. 1. Анализ патентной информации по применению микрокапсул в различных отраслях мировой промышленности

для получения положительных результатов требует значительного увеличения количества МК в носителе, что делает такую СОТС нерентабельной для пользователей.

В настоящей работе рассмотрен вопрос о повышении эффективности применения микрокапсулированных СОТС (МК СОТС) на операциях лезвийного резания, т.е. подачи микродоз СОТС, каждая из которых окружена оболочкой из непроницаемого для него материала. Размеры МК варьировались в пределах от сотен нанометров до 30...50 мкм. Для повышения эффективности их действия предполагалось введение в состав МК магниточувствительных компонентов, реагирующих на электромагнитные поля, возникающие в процессах резания.

Для реализации этой идеи был решен ряд вопросов, основными из которых являлись: разработка процесса изготовления МК, в состав которых входят магниточувствительные элементы, установление наличия и величины магнитного поля (или магнитной составляющей электромагнитного поля) при резании металлов, определение достаточности величины магнитодвижущей силы для придания МК направленного движения, направление перемещения МК при воздействии на них поля, условия их проникновения в зону контакта, механизмы вскрытия МК, условия возникновения смазочного эффекта и влияние МК СОТС на характеристики процесса резания и стойкость инструментов.

В результате был разработан авторский метод изготовления МК, имеющих в своем составе магниточувствительное вещество, в качестве которого использовали магнетит Fe_3O_4 с размерами частиц порядка 10 нм – магнитные микрокапсулы (ММК) (рис. 2). Данное вещество является одним из основных компонентов ферромагнитных жидкостей. За основу был взят метод простой коацервации, который отличается от других способов хорошей повторяемостью результатов, возможностью варьирования размеров микрокапсул.

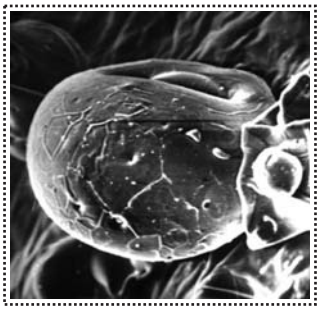


Рис. 2. Внешний вид микрокапсулы

Концепция направленного движения ММК, имеющих в своем составе магнетит Fe_3O_4, основана на положении классической физики о том, что ферромагнитная частица при воздействии на нее магнитным полем ориентируется по полю и может иметь движение вдоль силовых линий этого поля. Если при наведенных полях наличие поступательного движения МК не требует специальных пояснений, то в случае естественно возникающего поля следует определить вопрос: достаточна ли его величина для придания МК направленного движения.

Процессы, протекающие в зоне контакта (стружкоотделение, наличие СОТС, физические свойства материалов и др.) приводят к изменению силы тока. Эти колебания вызывают изменение во времени напряженности электрического поля, порожденного электрическим током, т.е. в зоне контакта существует переменное электрическое поле. Одновременно с этим в зоне резания постоянно присутствуют заряженные частицы (ионы, эмитируемые ювенильными поверхностями электроны, химические радикалы и др.). Наличие переменных электрических полей и заряженных частиц, согласно теории Максвелла, приводит к возбуждению магнитных полей, индукция которых может изменяться в широких пределах. Именно эти поля воздействуют на магнетит, заключенный в ММК, заставляя их двигаться по полю. При этом действующая магнитная сила всегда направлена в области пространственной неоднородности магнитного поля, где максимально сконцентрирован выход магнитных силовых линий [4]. Применительно к режущему инструменту такие области располагаются у вершины инструмента и его режущих кромок.

В литературе приводятся весьма противоречивые сведения о величине протекающего через зону контакта тока – от микроампер до единиц ампера. Однако специальное изучение этого вопроса различными исследователями показало, что сила тока при резании колеблется в пределах от 4,5...5,0 до 10 А [5–7]. При этом магнитная индукция проводника с током определяется выражением [4]:

$$B = \frac{2\mu_0 I}{4\pi r_0},$$

где μ_0 – магнитная постоянная, равная $1{,}26 \cdot 10^{-6}$ В·с/(А·м); r_0 – расстояние до проводника, м; I – сила тока.

При подаче МК СОТС в жидком носителе на расстоянии порядка 3 мм от вершины резца магнитная индукция составит $B = 0{,}2$ мТл. С учетом относительной магнитной проницаемости материала режущего инструмента ($\mu = 200...5000$), значение магнитной индукции может возрасти до 40...1000 мТл. Поступление МК в зону контакта будет наблюдаться лишь в том случае, если сила поля F_m, действующая на МК, превышает силу тяжести F_g. При массе капсулы $m \sim 3 \cdot 10^{-12}$ кг имеем:

$$F_m / F_g = F_m / mg \approx 49\ldots126.$$

Таким образом, теория показывает, что сила, действующая со стороны поля на ММК, превышает в 49–126 раз силу тяжести, т.е. ММК будет двигаться в сторону зоны контакта под влиянием естественно возникающих электромагнитных полей.

Измерение магнитной составляющей электромагнитного поля, возникающего в процессе лезвийной обработки, производилось при точении на специально созданной установке. Регистрирующим элементом установки являлась рамка с намотанным на нее проводом, которая использовалась как маятник, пересекающий магнитные силовые линии поля. В результате в рамке наводилась ЭДС индукции, которая усиливалась с помощью усилителя. Далее сигнал поступал на регистрирующий прибор.

ЭДС индукции ε_n (в каждом витке провода), возникающую в рамке при пересечении магнитных силовых линий с учетом затухающих гармонических колебаний рамки определяли для первых двух-трех периодов выражениями:

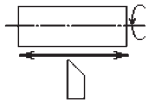
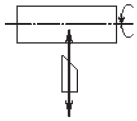
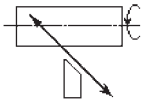
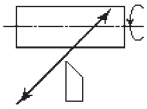
$$B = \frac{\varepsilon_n T}{2\pi SN} \text{ или } B = \frac{\varepsilon_n}{2\pi\nu SN}.$$

При проведении экспериментов период колебаний рамки составлял $\nu = 1$ с$^{-1}$, ее площадь $S = 4{,}04 \cdot 10^{-4}$ м^2, число витков $N = 20$. Исследования проводили после точения титанового сплава ВТ6 резцами из быстрорежущей стали Р6М5 при следующих режимах: $\nu = 0{,}15...0{,}50$ м/с, $S = 0{,}10$ мм/об, $t = 0{,}5$ мм. При этом было установлено (таблица), что различные положения плоскости качения приводили к результатам, значительно отличающимся друг от друга. Такое распределение значений ЭДС индукции указывало на резкую неоднородность магнитного поля в прирезцовой области, что было вызвано, по-видимому, сложной геометрией поля.

Изучение влияния скорости резания на величину магнитной индукции показало, что с увеличением скорости резания величина B возрастает нелинейно. Максимальные значения магнитной индукции отмечены при повышенных скоростях. Расчетами определено, что сила, действующая на МК со средним размером 30 мкм в 20–40 раз больше силы тяжести, т.е. достаточна для придания ММК направленного движения.

Направление движения ММК при действии на них магнитного поля изучалось в статике посредством специально наведенного магнитного поля между двумя резцами, изготовленными из стали Р6М5, а также между резцом и обрабатываемым материалом (рис. 3). При этом установлено, что в обоих случаях ММК стремились именно к режущим

Âëèÿí èå í àï ðàâëåí èÿ ï åðåì åù åí èÿ ðàì êè í à âåëè÷èí ó ì àãí èòí î é èí äóêöèè ï î ëÿ

№ п/п	Направление перемещения рамки	Вид сигнала	ЭДС ε_n, мВ	Индукция, B мТл
1			0,20	3,94
2			0,40	7,88
3			0,15	2,95
4			0,60	11,82

кромкам резцов и выстраивались по силовым линиям магнитного поля, протекающего по цепи инструмент–инструмент или деталь–инструмент. Увеличение количества ММК приводило к образованию мостиков из них, которые устойчиво соединяли деталь и резец вплоть до увеличения расстояния между ними до 10...15 мм. Для сравнения на рис. 3, *в* представлена фотография поведения ферромагнитной жидкости при тех же условиях эксперимента.

Изучение направления движения микрокапсул в реальных условиях резания проводилось по внешнему виду рабочих поверхностей резцов, изготовленных из быстрорежущей стали Р6М5, после точения сплава ВТ6. Установлено (рис. 4, *2*), что при использовании 1%-ной суспензии ММК рабочие поверхности резца были покрыты слоем вещества, представляющего собой полимер оболочек ММК, подвергнутый термической деструкции. Его количество увеличивалось по мере приближения к режущим кромкам как по передней, так и по задним поверхностям. Максимум фиксировался вблизи вершины инструмента – область выхода магнитных силовых линий.

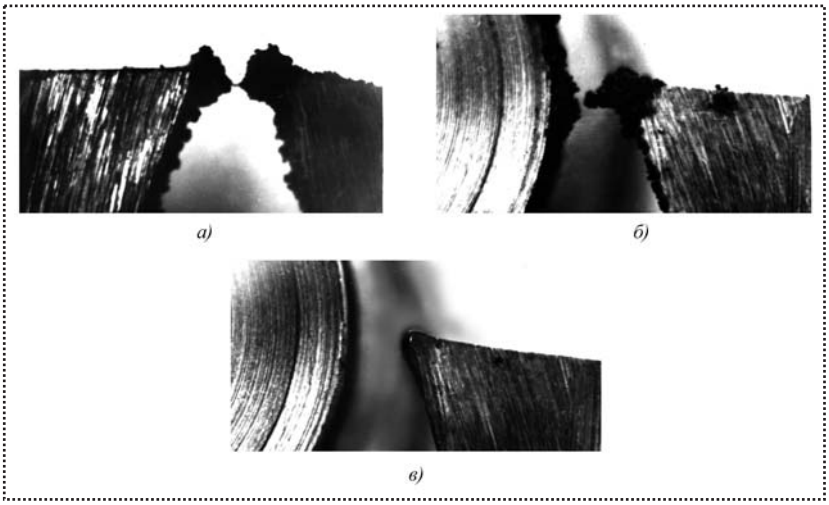


Рис. 3. Направление движения микрокапсул в условиях наведенного магнитного поля при B/r = 3,4 кТл/м:
а – между двумя резцами из стали Р6М5; *б* – между резцом (Р6М5) и поверхностью сплава ВТ6; *в* – ферромагнитной жидкости на режущем клине резца Р6М5

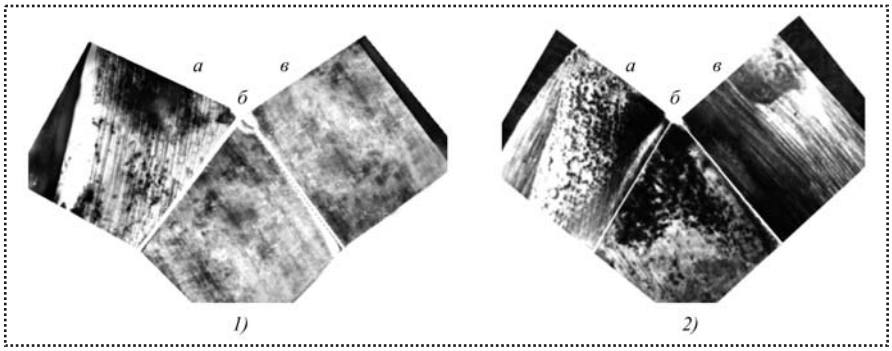


Рис. 4. Рабочие поверхности резцов Р6М5 после точения сплава ВТ6 при использовании:
1 – 4 %-ной МК СОТС; *2* – 1 %-ной ММК СОТС; *а* – передняя поверхность; *б* – вспомогательная задняя поверхность; *в* – главная задняя поверхность

Использование 4%-ной суспензии немагнитных МК (без магнетита) при аналогичных условиях резания приводило к появлению темных фрагментов только по передней поверхности. Отмечено, что их распределение носит вероятностный характер без какого-либо явно выраженного направления (рис. 4, *1*).

Определение скорости дрейфа микрокапсул производилось с помощью ячейки Керра. Для придания ММК движения в электрических полях в состав жидкого носителя дополнительно вводилось поверхностно-активное вещество ДНСА в концентрации, не превышающей критической концентрации мицеллообразования. В этом случае на контакты ячейки подавалось напряжение от 0 до 26 В. При использовании постоянного магнитного поля, напряженность которого изменялась от 0 до 7545 А/м, его возбуждение осуществлялось посредством электромагнита. Скорость дрейфа ММК определялась как время прохождения отдельно взятой ММК расстояния между двумя миллиметровыми штрихами, нанесенными на покровное стекло ячейки Керра.

Исследованиями установлено, что в электрическом поле скорость дрейфа ММК не превышала 0,67 мм/с (рис. 5, *а*). При этом отмечено, что с увеличением концентрации ПАВ скорость перемещения МК может не только возрастать, но и несколько снижаться. Это объясняется завершением образования мицеллярных слоев ПАВ вокруг ММК и, соответственно, приближением заряда *q* к некоторой предельной величине. Дальнейшее увеличение концентрации ПАВ в системе выше точки критической концентрации мицеллообразования в растворе вначале приводит к

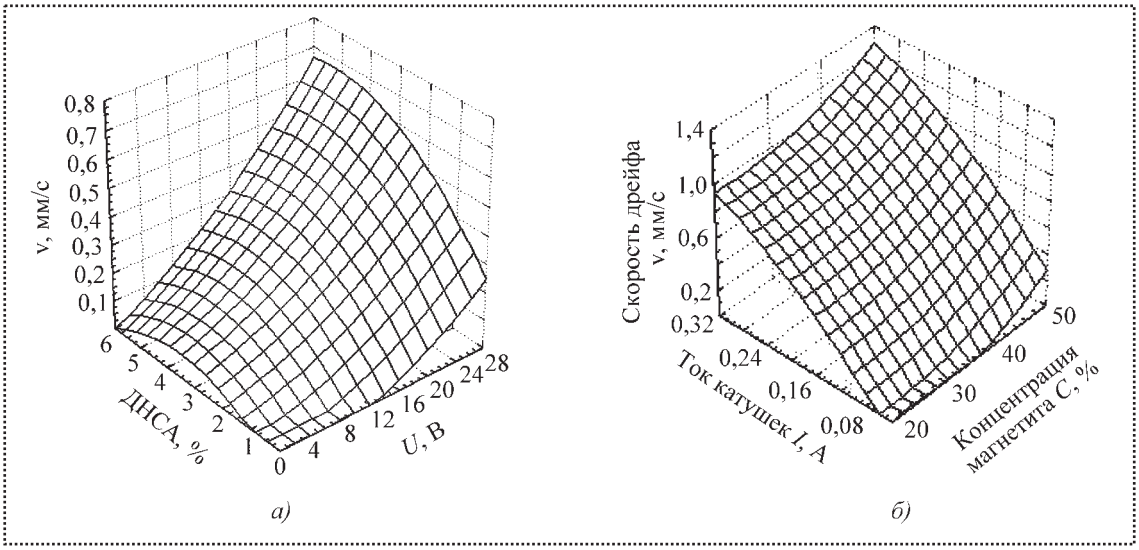


Рис. 5. Скорость движения ММК в электрическом (*а*) и магнитном (*б*) полях

образованию сферических, а затем цилиндрических мицелл. Большое их число увеличивает вязкость носителя и создает сопротивление движению МК, что выражается в уменьшении на 19...21 % скорости их дрейфа.

При управлении движением ММК магнитным полем концентрация магнетита в их составе и управляющий ток в катушках в равной степени влияли на скорость перемещения ММК. В этом случае максимальная скорость ММК более чем в 2 раза превысила предыдущее значение и зафиксирована на уровне 1,25...1,35 мм/с, причем движение МК наблюдалось уже при низких значениях токов (рис. 5, *б*). Максимальное значение скорости определено при количестве магнетита в составе ММК, равном 50 % от массы ее оболочки.

Стоит отметить, что в реальных условиях скорость перемещения ММК может значительно отличаться от полученных результатов как в одну, так и в другую сторону.

Реальные процессы резания металлов сопровождаются значительными температурами и давлениями в зоне контактирования с одной стороны, а с другой – теория резания металлов не исключает вероятность существования областей пониженного давления. Кроме того, в обоих процессах постоянно присутствует взаимное перемещение контактирующих поверхностей. В связи с этим в настоящих исследованиях были обоснованы четыре основных механизма вскрытия МК: механический (разрушение оболочки вследствие механического воздействия); термический (тепловое разрушение оболочек); гетеробарический (разрушение оболочек при изменении внешнего давления); диффузионный (истечение внутренней фазы через поры оболочек).

Изучение температур термического разрушения оболочек МК необходимо для прогнозирования их возможного приближения к зоне контакта. Зная распределение температурных полей вдоль рабочих поверхностей инструментов и параметры термодеструкции

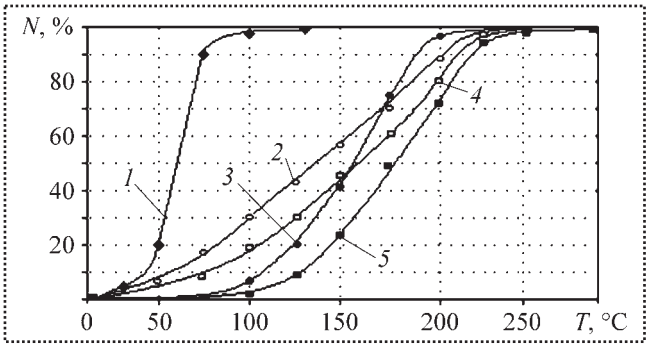


Рис. 6. Зависимость числа вскрытых МК от температуры их нагрева:
1 – пат. № 154015 (СССР); *2* – ММК-50 CCl_4; *3* – МК с CCl_4; *4* – ММК-50 с И-40А; *5* – МК с И-40А;
N – число повреждаемых микрокапсул; *T* – температура нагрева

оболочек ММК, можно судить о том, на какое минимальное расстояние от режущей кромки инструмента ММК способна приблизиться, сохраняя свою внутреннюю фазу.

Изучению были подвергнуты два вида МК: магнитные (имеющие в своем составе магнетит) и немагнитные (без введения Fe_3O_4), заполненные индустриальным маслом И-40А и четыреххлористым углеродом CCl_4. Исследования проводили в диапазоне температур 20...400 °С. Количество МК, претерпевших термическое разрушение, определялось подсчетом видимых в микроскоп поврежденных или оплавившихся МК. Считалось, что МК не претерпевает термического разрушения, если она без видимых последствий находилась при данной температуре в течение 30 с. Для сравнения, аналогичные исследования были проведены с МК авторами работы [8] с использованием в качестве носителя CCl_4.

Исследованиями установлено, что состав внутренней фазы МК не оказывает влияния на значения теплостойкости их оболочек. Наличие в оболочке ММК магнетита также не приводило к изменению температур вскрытия, максимальные значения которых зафиксированы в области 200...225 °С (рис. 6). Полученные значения более чем в 2 раза превысили температуры термодеструкции эталонных МК. Одинаковые условия при изготовлении МК и

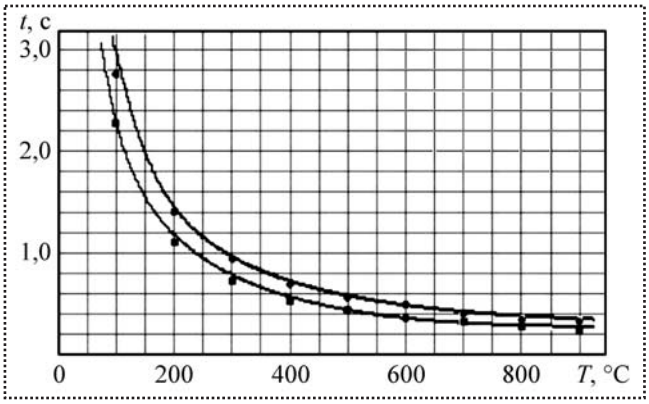


Рис. 7. Расчетная эффективная теплостойкость МК:
1 – МК с И-20А; *2* – ММК-50 с И-40А

при проведении исследований позволили сделать вывод о том, что зафиксированные в экспериментах высокие температуры вскрытия МК обусловлены выбором дубящего вещества на стадии сшивки оболочки МК при их изготовлении.

Имея невысокую теплопроводность полимерного материала оболочки, толщина которой порядка 3 мкм, и наличие направленного движения с некоторой скоростью, МК способны находиться некоторое время в областях, температура в которых значительно превосходит показанную выше температуру их термического разрушения. Проведенные расчеты показали, что изменение времени возможного пребывания МК при повышенных температурах подчиняется параболическому закону (рис. 7).

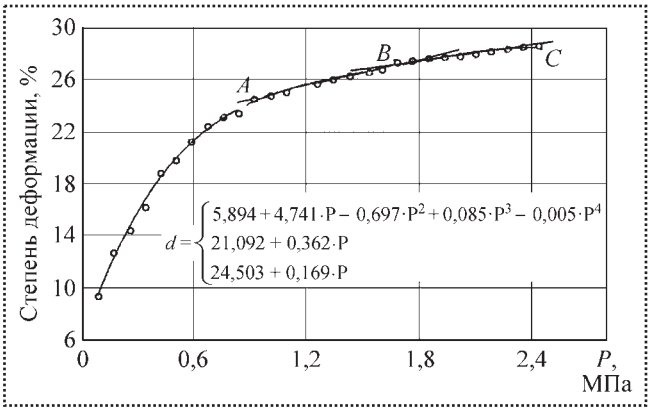


Рис. 8. Зависимость степени деформации МК от приложенного давления

Принимая во внимание величину средних температур, возникающих при резании быстрорежущим инструментом (порядка 600 °С), время существования ММК при этих температурах (0,4...0,5 с) и наличие у ММК направленного движения, можно утверждать, что ММК за время своего пребывания в зоне резания, при существующей технологии их подачи, имеют возможность без разрушения приближаться непосредственно к режущим кромкам или вершине инструмента. Это экспериментально подтверждается данными, представленными на рис. 4.

Изучение поведения МК в условиях изменяющегося внешнего давления проводили в два этапа: при повышенном внешнем давлении и при уменьшении внешнего давления.

При избыточном внешнем давлении исследования проводили в условиях изотермического одноосного сжатия на специально изготовленном микропрессе. МК помещали внутрь прозрачного цилиндра, подпрессовывали металлическим поршнем и выдерживали 5...6 мин под давлением собственного веса поршня. Высоту столба МК h_1 после подпрессовки принимали за нулевую отметку. Дальнейшее нагружение поршня приводило к деформации МК и изменению высоты их столба в цилиндре на некоторую величину Δh, которая характерна для каждого вида МК и зависит от способа их получения. Выдержка образца на каждом этапе нагружения составляла 2...3 мин. Нагружение МК продолжалось до их разрушения.

Детальное рассмотрение полученных кривых показало, что каждая из них представляет собой сочетание отрезков, описываемых различными уравнениями (рис. 8). Такая последовательность отрезков наглядно описывает состояние МК и их оболочек при нагружении. Так, на отрезке *OA* наблюдалась деформация оболочек МК без их вскрытия, в результате чего их сферическая форма искажалась с частичным заполнением существующих пустот между отдельными МК.

Отрезок *AB* представляет собой своеобразную переходную область. Характерным для этой области является то, что при данных нагрузках прекращались процессы формоизменения МК, обусловленные пластичностью их оболочек. Максимальные значения этой характеристики образца соответствовали точке *B*. Одновременно с этим в точке *A* начинали разрушаться наименее прочные оболочки отдельных МК, количество которых незначительно возрастало по мере приближения к точке *B*.

Превышение удельными нагрузками значений 0,9...1,1 МПа характеризовало окончание процесса пластической деформации МК и переход в диапазон прочностных характеристик их оболочек. При этом дальнейшее увеличение давления на образец приводило к разрушению достаточно большого количества МК. В точке *C* процесс вскрытия оболочек прекращался, так как практически все МК разрушены. Визуальным наблюдением подтверждено, что при нагрузках, соответствующих точке *C* и превышающих их, в цилиндре присутствовало жидкое содержимое ядер МК, в котором находились пустые оболочки и незначительное количество невскрытых МК.

При уменьшении внешнего давления одновременно оценивали действие двух механизмов декапсулирования (рис. 9). В результате проведенных исследований определены условия начала массового вскрытия МК, обусловленного прочностными характеристиками оболочек, и оценен вклад диффузионных процессов по высвобождению внутренней фазы. С помощью вакуумной камеры поста ВУП-4 установлено, что минимальное уменьшение массы капсул наблюдалось для ММК, содержащих индустриальное масло (кривые *1*), а максимальное – для ММК с четыреххлористым углеродом (кривые *2*).

На основе проведенных исследований предложена схема, отображающая проявление различных механизмов вскрытия МК (рис. 10). На приведенной схеме области существования микрокапсул и возможных механизмов их декапсулирования представлены четкими границами. В реальных условиях, согласно вероятностному характеру распределения полученных результатов, таких границ не наблюдалось. Экспериментами определены расположенные вдоль линий *ABC* и *DBE* области вероятностного существования и вскрытия МК. Причем в этих областях механизмы декапсулирования проявлялись, как правило, в сложной форме (например, разрушение в результате одновременного действия повышенных температур и давлений; температур, давлений и механического воздействия и т.д.)

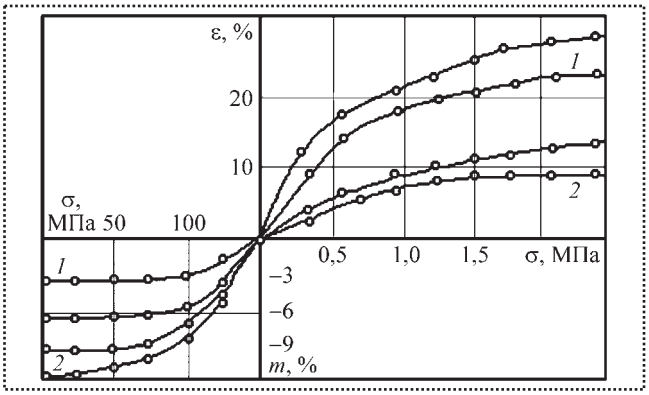


Рис. 9. Совмещенные результаты поведения МК при изменении внешнего давления

Изучение характеристик процесса резания и стойкостных показателей инструментов в реальных условиях проводилось на операциях точения и сверления углеродистых и коррози-

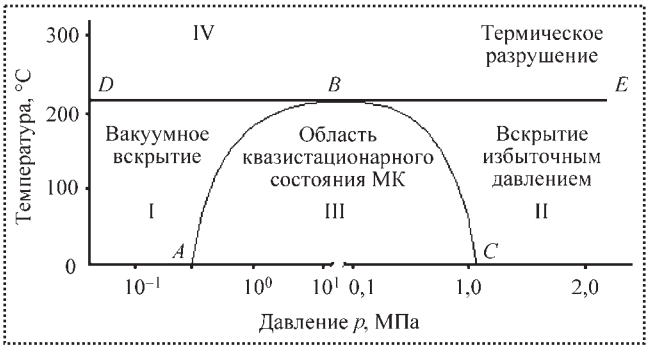


Рис. 10. Схема механизмов высвобождения внутренней фазы микрокапсул при внешних воздействиях

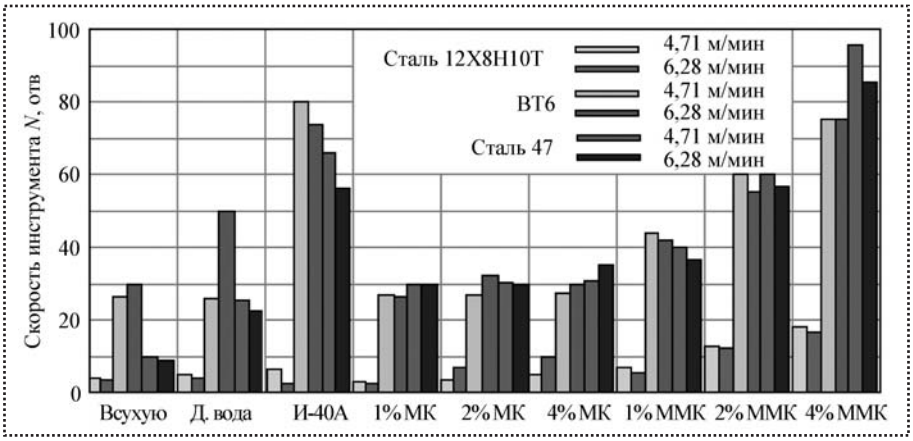


Рис. 11. Гистограмма стойкости сверл из быстрорежущей Р6М5 при сверлении всухую и с применением СОТС

1,0...4,0 % (рис. 11) способствует эффективному повышению стойкости режущих инструментов не только по сравнению с резанием всухую, но и при использовании стандартных водоэмульсионных и масляных СОТС. Дальнейшее увеличение количества ММК практически не оказывало заметного влияния на повышение работоспособности инструментов.

онно-стойких сталей, титановых и сложнолегированных сплавов в лабораторных и производственных условиях. Микрокапсулы подавали в зону резания в виде суспензии в дистиллированной воде капельным методом.

Установлено, что применение микрокапсулированных СОТС с концентрацией ММК

Одним из основных параметров процесса резания является качество обработанных поверхностей, в частности, величина и знак остаточных напряжений. Исследованиями, проведенными в производственных условиях ММПП "Салют" [9], установлено, что применение ММК СОТС имеет показатели не хуже других технологических

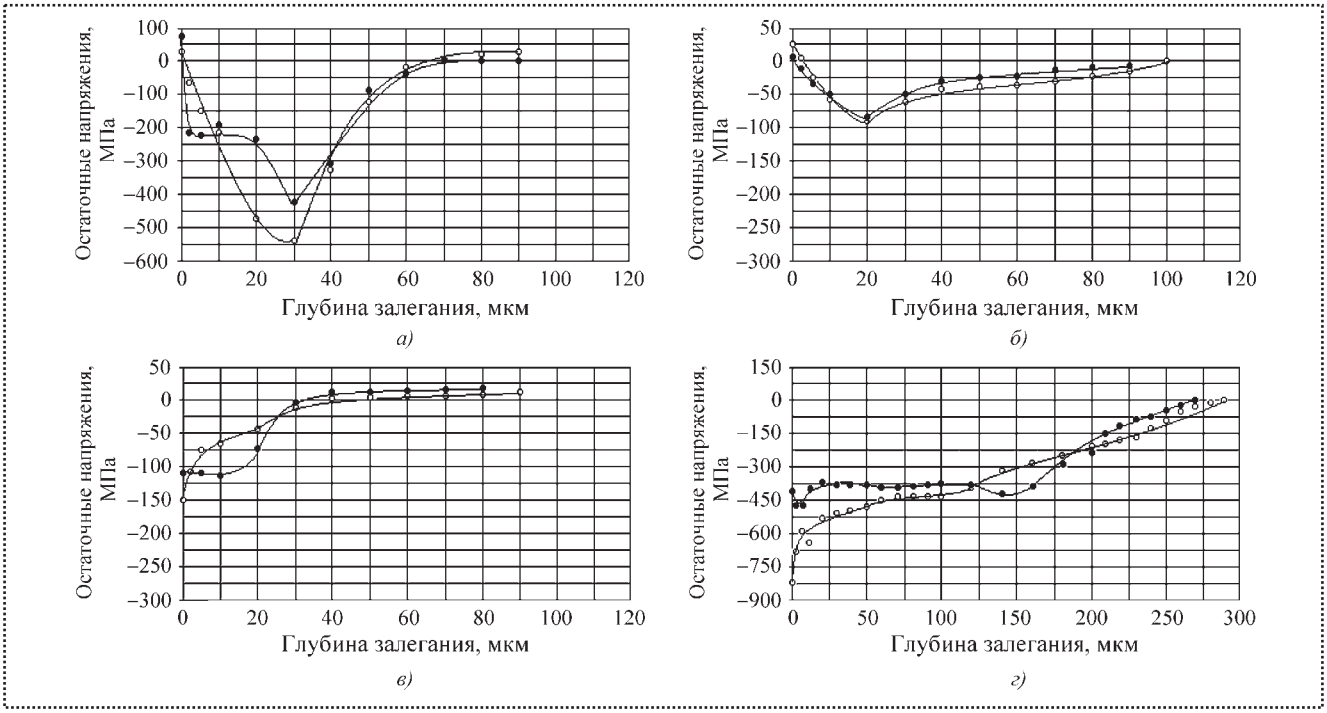


Рис. 12. Эпюры остаточных напряжений в образцах сплава ВТ9 (по два образца) после точения резцами ВК-6ОМ с использованием в качестве СОТС:

а – сжатого воздуха; *б* – магнитных микрокапсул; *в* – ионизированной воздушной среды; *г* – упрочняющей дробеструйной обработки шариками $D = 3$ мм

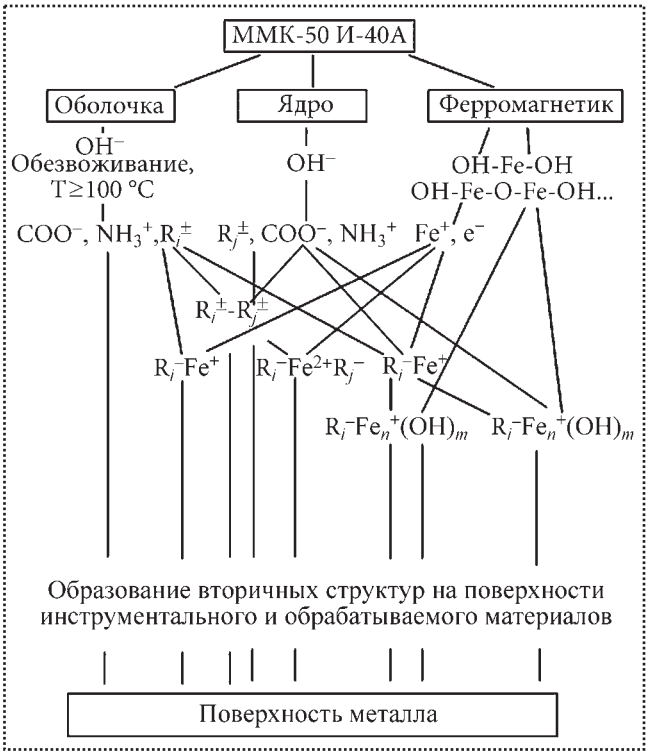


Рис. 13. Модель активации протекания радикально-цепных реакций при использовании магнитных микрокапсул

средств при высокой повторяемости результатов (рис. 12).

Механизм действия ММК при резании достаточно сложен и, по нашему мнению, является результатом совместного действия всех компонентов, входящих в состав ММК (рис. 13), активированного протеканием радикально-цепных реакций в зоне контакта. Это подтверждается данными экспериментов по трению и резанию, при проведении которых в качестве смазочных материалов использовались отдельные компоненты МК; результатами исследований по замене магнетита на немагнитные вещества, электронной микроскопией и термографическими исследованиями, которые показали на протекание в зоне контакта сложных, параллельно идущих химических реакций (рис. 14, 15).

В ходе проведенных экспериментальных исследований также было установлено, что оптимальный расход ММК СОТС при чистовом точении составил 2...3 кап/с.

С учетом массы одной капли жидкого носителя (порядка 0,04 г), расход СОТС составил 0,08...0,12 г/с, при этом масса использованных ММК в оптимальной концентрации составила 0,0016...0,0024 г/с. За один час непрерывного точения количественный расход ММК составлял 5,76...8,64 г/ч, а СОТС с ММК – 288...432 г/ч. Сравнение с источниками информации по нормированному расходу смазки показал, что применение ММК СОТС позволил уменьшить расход СОТС по сравнению с:

распыленной 1,5%-ной эмульсией . . . . . 1,39 раза
поливом маслом при чистовом точении . . . . 1328,13 раза
поливом эмульсией . . . . . 2078,33 раза

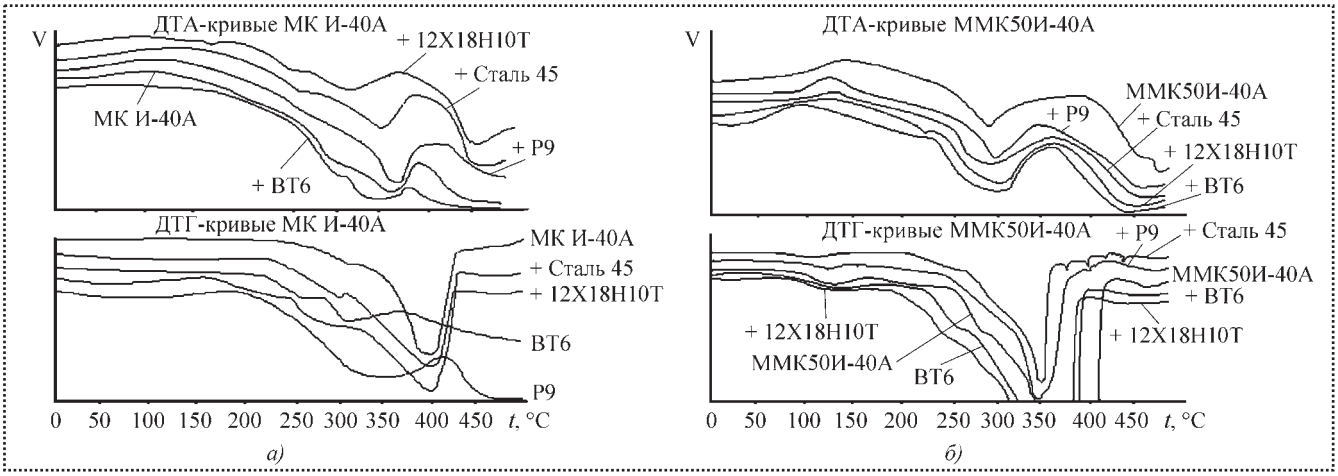


Рис. 14. Дериватограммы термографических исследований:
а – МК с И-40А; *б* – ММК-50 с И-40А

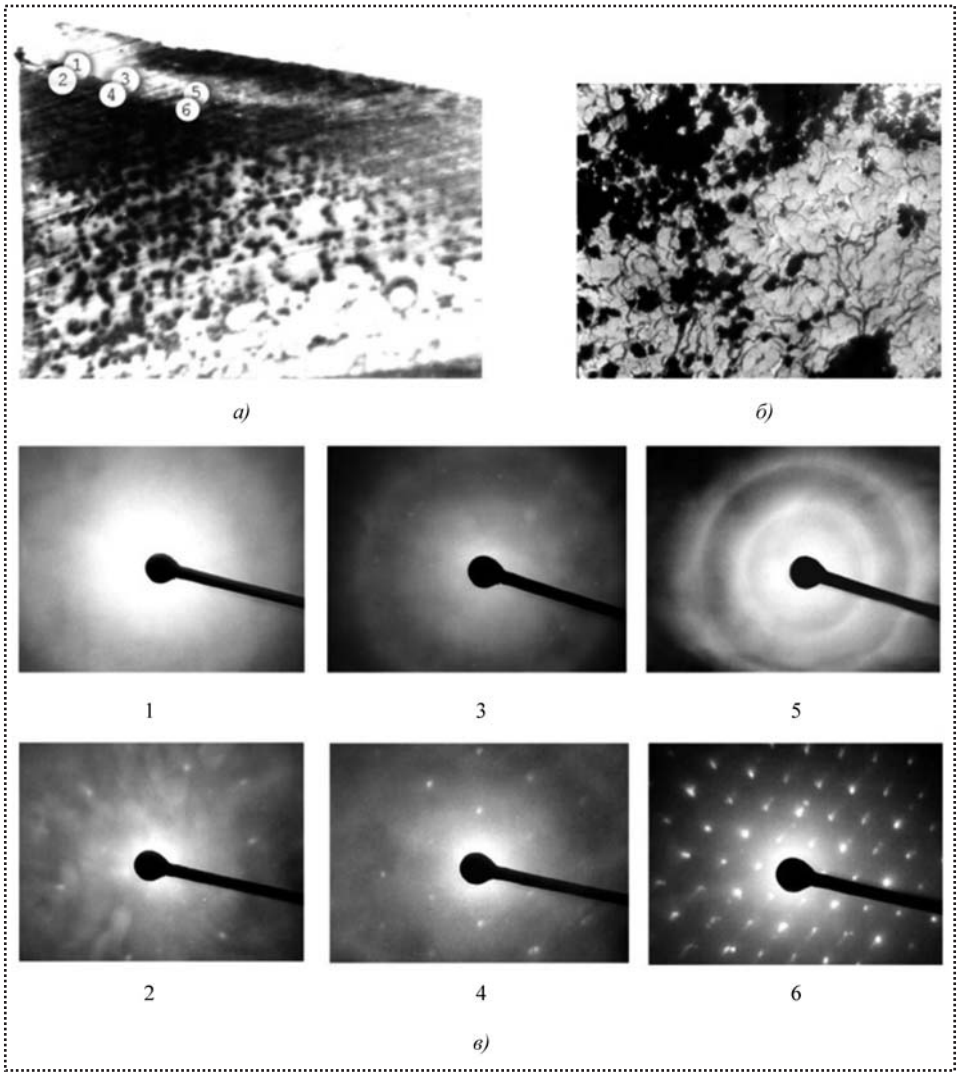


Рис. 15. Результаты электронно-графических исследований вторичных структур методом тонких фольг, сформированных на передней поверхности резца при точении стали Ст3 с использованием ММК-50:
а – области исследования на передней поверхности резца, ×10; *б* – то же, ×8600; *в* – электронограммы вторичных структур; v = 0,48 м/с, *S* = 0,1 мм/об, *t* = 0,5 мм

С учетом процентной доли вскрытых МК в зоне резания (порядка 10 %), выброс вредных компонентов в окружающую среду уменьшился еще в 10 раз по сравнению с классическими методами подачи СОТС в зону контакта.

Заключение

Рассмотренный в данной работе вопрос о возможности подачи СОТС при резании металлов в виде магнитных микрокапсул и их влияния на процессы контактного взаимодействия относится к одному из направлений, сложившихся в мировой практике и направленных на снижение техногенных рисков и улучшение экологии металлообработки. Конструирование новых составов экологически чистых или экологически безвредных СОТС, техника их применения представляет собой многогранную задачу, решение которой должно базироваться на всестороннем и глубоком изучении физико-химических процессов, протекающих в контактной зоне между инструментальным и обрабатываемым материалами.

О сложности этих процессов при наличии внешней среды свидетельствуют работы

Г.П. Виноградова, А.С. Ахматова, В.Н. Латышева и других исследователей, которые показали, что в настоящее время нет цельного представления о процессах, протекающих в зоне контакта при резании металлов. Наши знания ограничиваются отдельными фрагментами о проявлении эффектов пластифицирования и охрупчивания, сформулированных академиком П.А. Ребиндером, о протекании тех или иных химических реакций или физических явлений.

В соответствии с этим проведение исследований с целью выявления физико-химических закономерностей в зоне контакта инструмента с обрабатываемым материалом и разработкой на этой основе новых СОТС и способов их применения, обеспечивающих выполнение требуемых как экологических, так и технологических характеристик, является актуальной научно-технической проблемой.

Библиографический список

1. **Sertificate** № 297596 (Japan). 1990.

2. **Девочкин А.А.** Разработка составов и техники применения смазочно-охлаждающих композиций при обработке резанием молибдена и алюминия // Дис. ... канд. техн. наук. Горький. 1988. 203 с.

3. **Whitnev R.A., Colvin V.S., Mulligan J.C.** / Two component cutting/cooling fluids for high speed machining / МКИ F 01 M 5/00.

4. **Кухлинг Х.** Справочник по физике // Пер. с нем. М.: Мир. 1982. 520 с.

5. **Якунин Г.И., Умаров Э.А., Анцупов А.А.** О воспроизводимости эффектов влияния термотоков и намагниченности резцов на стойкость инструмента при соответственных температурно-скоростных условиях резания // Электрические явления при трении, резании и смазке твердых тел. М.: Наука. 1973. С. 132–137.

6. **Опитц Г.** Об износе режущего инструмента // Новые работы по трению и смазке. М., 1959.

7. **Постников С.Н.** Исследование электрических явлений при трении и резании металлов // Автореферат дис. ... канд. техн. наук. М.: ИМАШ. 1968.

8. **Девочкин А.А., Латышев В.Н., Годлевский В.А., Железнов К.Н.** Микрокапсулирование как метод введения трибоактивных присадок в смазочные материалы при резании // Тезисы докл. Всесоюзного научно-техн. семинара "Опыт применения новых смазочно-охлаждающих сред при обработке металлов резанием". Горький. 1987. С. 156–159.

9. **Поклад В.А., Горелов В.А., Полоскин Ю.В. и др.** Влияние условий экологически безопасного резания с охлаждением ионизированной газовой средой на качество поверхностного слоя и долговечность деталей // В сб. трудов научно-технич. симпозиума "Двигатели и экология". М.: 2002.

Контактные координаты автора

Наумов Александр Геннадиевич – e-mail: agn8@yandex.ru

Ярофри-2010

С 28 по 30 сентября 2010 года в г. Ярославле, отмечавшем свое тысячелетие со дня основания, проходил 8-й Международный симпозиум по фрикционным материалам ЯРОФРИ-2010.

Â ðàìêàõ ïðîãðàììû ñèìïîçèóìà ßðîôðè-2010 ðàññìàòðèâàëèñü âîïðîñû:

– óãëóáëåíèÿ ïðèðîäû ôðèêöèîííîãî âçàèìîäåéñòâèÿ â óçëàõ òðåíèÿ ñîâðåìåííûõ ìàøèí;

– ñîâåðøåíñòâîâàíèÿ òåõíîëîãèè èçãîòîâëåíèÿ è îáðàáîòêè ôðèêöèîííûõ ìàòåðèàëîâ;

– ðàçðàáîòêè íîâûõ ýêîëîãè÷åñêè ÷èñòûõ ôðèêöèîííûõ ìàòåðèàëîâ äëÿ ñîâðåìåííûõ ìàøèí è îáîðóäîâàíèÿ.

Òàêæå ñîñòîÿëñÿ îáìåí ìíåíèÿìè ó÷åíûõ, ïðîèçâîäñòâåííèêîâ è òåõíè÷åñêèõ ðàáîòíèêîâ, îáñëóæèâàþùèõ ìàøèíû ïî âîïðîñó äàëüíåéøåãî ñîâåðøåíñòâîâàíèÿ èñïîëüçîâàíèÿ ôðèêöèîííûõ ìàòåðèàëîâ â óçëàõ òðåíèÿ ìàøèí è îáîðóäîâàíèÿ.

Îðãàíèçàòîðàìè ñèìïîçèóìà ßðîôðè-2010 áûëè: ÎÀÎ "ÒÈÈÐ", ÎÀÎ "ÔÐÈÒÅÊÑ", Àññîöèàöèÿ èíæåíåðîâ-òðèáîëîãîâ Ðîññèè (ÀÈÒ), Ðîññèéñêàÿ Èíæåíåðíàÿ Àêàäåìèÿ (ÐÈÀ) è Íàöèîíàëüíûé êîìèòåò ïî òðèáîëîãèè.

Â ïîäãîòîâêå è ðàáîòå ñèìïîçèóìà ïðèíÿëè ó÷àñòèå ñïåöèàëèñòû èç Ãåðìàíèè, Èòàëèè, Íèäåðëàíäîâ, ÑØÀ, Àâñòðèè, Êèòàÿ, Ôèíëÿíäèè, Áåëàðóñè, Àðìåíèè è Ðîññèè. Ó÷àñòâîâàëè ïðåäñòàâèòåëè ÏÎ "Ìèíñêèé òðàêòîðíûé çàâîä" (Áåëàðóñü), ÎÀÎ "ÀâòîÂÀÇ", ÎÀÎ "Çàâîä ÀÒÈ" (ã. Ñàíêò-Ïåòåðáóðã), ÎÎÎ ÏÎ "Íà÷àëî" (ã. Íàáåðåæíûå ×åëíû, Òàòàðñòàí), ÍÒÖ "Âàãîí-òîðìîç" ôèëèàë ÎÀÎ "ÐÆÄ" (ã. Åêàòåðèíáóðã), ÎÀÎ "ÒÈÈÐ" (ã. ßðîñëàâëü), ÎÀÎ "Ôðèòåêñ" (ã. ßðîñëàâëü), ÎÀÎ "345 ìåõàíè÷åñêèé çàâîä" (ã. Áàëàøèõà) è äð.

Ðàáî÷èìè ÿçûêàìè íà ñèìïîçèóìå ßðîôðè-2010 áûëè ðóññêèé è àíãëèéñêèé.

Íàèáîëüøèé èíòåðåñ âûçâàëè äîêëàäû, ïðåäñòàâëåííûå íà ïëåíàðíûõ çàñåäàíèÿõ è ïðè îáñóæäåíèè òðåòüèì "êðóãëûì ñòîëîì":

– **À.Â. ×è÷èí àäçå, À.Þ . Àëáàãà÷èåâ** (Èí ñòèòóò ì àø èí î âåäå-í èÿ ÐÀÍ , Ì î ñêâà, Ðî ññèÿ) "Òðèáî ëî ãè÷åñêî å èññëåäî âàí èå í à-í î ñì àçî ÷í û õ è í àí î êî ì ï î çèöèî í í û õ ì àòåðèàëî â".

– **Â.Ï . Ñåðãèåí êî , Ñ.Í . Áóõàðî â** (ÃÍ Ó "Èí ñòèòóò ì åõàí èêè ì åòàëëî ï î ëèì åðí û õ ñèñòåì èì . Â.À. Áåëî ãî Í ÀÍ Áåëàðóñè" Ãî-ì åëü, ðåñï óáëèêà Áåëàðóñü) "Ì àòåðèàëî âåä÷åñêèå ï î äõî äû ê ñí èæåí èþ âèáðàöèè è ø óì à â í åñòàöèî í àðí û õ ï ðî öåññàõ òðå-í èÿ".

– **Â.È. Êî ëåñí èêî â, À.Ò Êàçàêî â, À.Ï . Ñû ÷åâ, À.Â. Ñèäàø åâ** ("Ðî ñòî âñêèé ãî ñóäàðñòâåí í û é óí èâåðñèòåò ï óòåé ñî î áù åí èÿ", ã Ðî ñòî â-í à-Äî í ó, Ðî ññèÿ) "Ñî âðåì åí í û å ì åòî äû èññëåäî âàí èÿ ñåãðåãàöèî í í û õ è äèô ô óçèî í í û õ ï ðî öåññî â â òðèáî ñèñòåì å "êî ëåñî – òî ðì î çí àÿ êî ëî äêà".

– **Â.Ã Êóðàí î â** (Ñàðàòî âñêèé ãî ñóäàðñòâåí í û é òåõí è÷åñêèé óí èâåðñèòåò, ã Ñàðàòî â, Ðî ññèÿ) "Óï ðàâëåí èå ñàì î î ðãàí èçàöèåé òðèáî ñî ï ðÿæåí èé (ÑÒÑ) í à î ñí î âå ýí åðãåòè÷åñêî ãî ï î äõî äà è çàêî í î ì åðí î ñòåé â èõ ì åõàí èçì àõ".

– **Ë.À. Âóêî ëî â** (Î ÀÎ "ÂÍ ÈÈÆÒ', ã Ì î ñêâà) "Æåëåçí î äî ðî æ-í û å òî ðì î çí û å êî ëî äêè í î âî ãî ï î êî ëåí èÿ".

– **À.Â. ×è÷èí àäçå, Þ .Ì . Ëóæí î â, À.Ò Ðî ì àí î âà** (Àññî öèà-öèÿ èí æåí åðî â-òðèáî ëî ãî â Ðî ññèè (ÀÈÒ)) "Òðèáî òåõí è÷åñêèå ï î äõî äû ê î ï ðåäåëåí èþ ñåáåñòî èì î ñòè ï åðåâî çî ê ï î æåëåçí û ì äî ðî ãàì ".

– **Â.È. Èçþ ì î âà, Ì .Ç. Ëåâèò, Í .À. Êðàéí î âà, Ñ.Â. Êî ÷èí à** (Î ÀÎ "ÒÈÈÐ", ã ßðî ñëàâëü, Ðî ññèÿ) "Í î âû å êî ì ï î çèöèî í í û å ô ðèêöèî í í û å ì àòåðèàëû Î ÀÎ ÒÈÈÐ è èçäåëèÿ èç í èõ".

Âî âñåõ äî êëàäàõ, ï ðåäñòàâëåí í û õ í à ñèì ï î çèóì å ßðî ô-ðè-2010, ï î ä÷åðêèâàëî ñü î ãðî ì í î å âëèÿí èå í à óñï åø í óþ ðàáî-òó ô ðèêöèî í í û õ óçëî â ì àø èí è ï ðî öåññî â, ï ðî èñõî äÿù èõ í à ì èêðî óðî âí å ô ðèêöèî í í û õ ì àòåðèàëî â.

Ï ðè ï î äâåäåí èè èòî ãî â ðàáî òû 8-ãî Ì åæäóí àðî äí î ãî ñèì ï î-çèóì à "ßðî ô ðè-2010" áû ëî î òì å÷åí î , ÷òî î í áû ë ï ðî âåäåí í à âû ñî êî ì í àó÷í î ì è î ðãàí èçàöèî í í î ì óðî âí å, è âí åñ áî ëüø î é âêëàä â ðàçâèòèå ðàáî ò ï î äàëüí åéø åì ó ñî âåðø åí ñòâî âàí èþ ô ðèêöèî í í û õ ì àòåðèàëî â â ñòðàí àõ – ó÷àñòí èöàõ äàí í î ãî ñèì-ï î çèóì à.

Ó÷àñòí èêè Ì åæäóí àðî äí î ãî ñèì ï î çèóì à "ßðî ô ðè-2010" âû-ðàæàþ ò ãëóáî êóþ áëàãî äàðí î ñòü î ðãàí èçàòî ðàì ñèì ï î çèóì à – ðóêî âî äñòâó ßðî ñëàâñêî é î áëàñòè çà î òëè÷í óþ î ðãàí èçàöèþ åãî ðàáî òû è çàáî òëèâî å âí èì àí èå ê åãî ó÷àñòí èêàì .

Следующее заседание уже 9-го симпозиума по фрикционным материалам рекомендовано провести в городе Ярославле через 2 года.

Ê ñâåäåíèþ àâòî ðîâ æóðíàëà «ÒÐÅÍÈÅ È ÑÌÀÇÊÀ Â ÌÀØÈÍÀÕ È ÌÅÕÀÍÈÇÌÀÕ»

В редакцию предоставляются:

Распечатанная рукопись (на белой бумаге (формата А4) на одной стороне листа) с подписью всех авторов и обязательно электронная версия – файлы с набором текста (шрифт Times New Roman в форматах DOC и PDF).

Электронная версия может быть выслана по e-mail: sborka@mashin.ru

Требования к статьям

1. Обязательно представлять на русском и английском языках:

– фамилии, имена и отчества авторов, название учреждения, в котором выполнялось исследование;
– название статьи;
– аннотацию к статье;
– ключевые слова.

2. Начало статьи должно быть оформлено по следующему образцу:

– УДК (индекс статьи по Универсальной десятичной классификации http://teacode.com/online/udc/);
– авторы (с указанием ученой степени);
– полное название учреждения, в котором выполнялось исследование;
– город;
– страна (для иностранных авторов).

3. Формулы, буквенные обозначения (прописные и строчные, латинского (не готического) и греческого алфавитов), цифры, знаки и их расположение должны быть четкими и различимыми. Все латинские буквы набираются курсивом, русские и греческие – прямо.

4. После текста должен идти список литературы, используемой при написании статьи.

Составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется по ГОСТ 7.0.5–2008.

Ссылки на иностранную литературу следует писать на языке оригинала без сокращений.

5. Все страницы в статье должны быть пронумерованы.

6. Иллюстрации, помимо вставленных в текст, представляются в виде отдельных файлов (DOC, TIFF, PDF, JPEG с разрешением 600 dpi).

Рисунок должен быть четким и иметь подрисуночную подпись. Объяснение рисунков и фотографий в тексте и подписи к ним должны соответствовать содержанию рисунков. Данные таблиц и рисунков не должны дублировать текст.

7. Подписи к иллюстрациям следует представлять отдельным списком.

8. Обязательно должны быть приложены сведения об авторах.

Указаны: Ф.И.О., ученая степень и звание (если есть), место работы, должность, адреса и телефоны (домашний и служебный), факс и e-mail. **Названия институтов и учреждений необходимо раскрывать полностью.**

Все статьи, поступающие в редакцию, проходят рецензирование.

В случае отклонения статьи редакционным советом журнала редакция оставляет за собой право сообщать автору о решении ред. совета без рецензии.

Материалы, присланные в редакцию, обратно не высылаются.

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромынский пер., 4
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение".

Адрес электронной почты редакции журнала: **sborka@mashin.ru.** Web-site: **www.mashin.ru**
Телефоны редакции журнала: 8(499) 268-38-42; тел./факс 8(499) 268-85-26; факс: 8(499)269-48-97.

Дизайнер *Поджиботов К.Ю.* Технический редактор *Андреева Т.И.* Корректоры *Сажина Л.И.*, *Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 11.10.10 г. Подписано в печать 14.12.10 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 5,74. Заказ 942. 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.