



Издается  
с июля 2005 г.

# ТРЕНИЕ И СМАЗКА В МАШИНАХ И МЕХАНИЗМАХ

№ 2  
февраль  
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 (МСНЮ), 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

**Заместители председателя:**  
академик РИА академик МИА  
А.В. ЧИЧИНАДЗЕ Ю.М. ЛУЖНОВ

**Главный редактор**  
И.Н. ЖЕСТКОВА

**Редакционный совет:**

**МОСКВА**

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

**БРЯНСК**

О.А. ГОРЛЕНКО  
Е.А. ПАМФИЛОВ

**КАЛИНИНГРАД**  
С.В. ФЕДОРОВ

**КЕМЕРОВО**

А.Н. КОРОТКОВ

**НАЛЬЧИК**

М.А. МАМХЕГОВ

**РОСТОВ-НА-ДОНУ**

И.М. ЕЛМАНОВ  
А.С. КУЖАРОВ  
А.А. РЫЖКИН

**РЫБИНСК**

В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ

**САМАРА**

Д.Г. ГРОМАКОВСКИЙ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**

Л.И. ПОГОДАЕВ  
**СТАВРОПОЛЬ**  
Н.С. ПЕНКИН

**ТВЕРЬ**

Н.Б. ДЕМКИН

**ТОМСК**

В.Е. ПАНИН  
А.В. КОЛУБАЕВ

**УФА**

В.Ю. ШОЛОМ  
(зам. главного редактора)

**ХАБАРОВСК**

А.Ю. КОНЬКОВ

**БЕЛАРУСЬ**

Н.К. МЫШКИН

**МОЛДОВА**

В. ГОЛОГАН

**УКРАИНА**

С.А. КЛИМЕНКО

В.В. ШЕВЕЛЯ

**ГЕРМАНИЯ**

Г. ФЛЯЙШЕР

А. ЖЕРВЕ

Г. ТЕППЕР

**ПОЛЬША**

Я. СЕНАТОРСКИЙ

М. ЩЕРЕК

С. ПЫТКО

**Редакция:**

Н.М. КУЩ-ЖАРКО,  
И.М. ГЛИКМАН

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ И ДИАГНОСТИКА

**Семёнов А.П.** Особенности измерения твердости при сверхмалых нагрузках алмазных и алмазоподобных покрытий ..... 3

**Безъязычный В.Ф., Замятин В.Ю., Замятин А.Ю., Замятин Ю.П.** Аналитическое приложение к испытательным средствам для определения фрикционно-усталостных характеристик поверхностей при их упругом контактировании ..... 13

### ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ

**Чертовских С.В., Шустер Л.Ш., Столяров В.В.** Триботехнические характеристики наноструктурного сплава  $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ , полученного электропластической деформацией ..... 17

### СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПРИСАДКИ

**Тесакова М.В., Парфенюк В.И., Годлевский В.А.** Триботехнические характеристики смазочных композиций на основе ультрадисперсных медьсодержащих порошков, полученных электрохимическим методом ..... 22

**Додонова Д.А., Пичугин В.Ф., Лаптев Д.В.** Исследование антифрикционных и противоизносных свойств алюминийсодержащей смазочной композиции ..... 27

### РАСЧЕТ, КОНСТРУИРОВАНИЕ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

**Макушин А.А., Кулаков А.Т., Денисов А.С.** Анализ потерь давления масла в каналах коленчатого вала двигателя ..... 34

**Вуколов Л.А.** Тормозные колодки повышенной работоспособности ..... 41

**Шевцов С.Н., Сайко И.Б., Клименко А.А., Овечкин И.В.** Комбинированный подшипник скольжения ..... 44

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

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

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

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.



Publishes  
from July, 2005

THE MONTHLY SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL JOURNAL

# FRICION & LUBRICATION IN MACHINES AND MECHANISMS

Nº 2  
February  
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 advisory board**

Academician of RAS and REA  
V.I. KOLESNIKOV

**Vice-Presidents:**

Academician of REA Academician of IEA  
A.V. CHICHINADZE YU.M. LUZHNOV

**Editor in Chief:**

I.N. ZHESTKOVA

**Editorial advisory board:**

<b>MOSCOW</b>	<b>ST.-PETERSBURG</b>
I.A. BUYANOVSKY	L.I. POGODAEV
D.N. GARKUNOV	<b>STAVROPOL'</b>
V.V. GRIB	N.S. PENKIN
S.M. ZAKHAROV	<b>TVER</b>
V.YA. KERSHENBAUM	N.B. DEMKIN
A.T. ROMANOVA	<b>TOMSK</b>
I.G. FOOKS	V.E. PANIN
<b>BRYANSK</b>	A.V. KOLUBAEV
O.A. GORLENKO	<b>UFA</b>
E.A. PAMFILOV	V.YU. SCHOLOM (Deputy chief editor)
<b>KALININGRAD</b>	<b>KHABAROVSK</b>
S.V. FEDOROV	A.YU. KONKOV
<b>KEMEROVO</b>	<b>BELARUS'</b>
A.N. KOROTKOV	N.K. MYSHKIN
<b>NALCHIK</b>	<b>MOLDOVA</b>
M.A. MAMHEGOV	V. GOLOGAN
<b>ROSTOV-ON-DON</b>	<b>UKRAIN</b>
I.M. ELMANOV	S.A. KLIMENKO
A.S. KUZHAROV	V.V. SHEVELYA
A.A. RYZHKIN	<b>GERMANY</b>
<b>RYBINSK</b>	G. FLEISCHER
V.F. BEZ"YAZYCHNY	A. GERVEY
<b>SAMARA</b>	G. TEPPER
D.G. GROMAKOVSKY	<b>POLAND</b>
	JA. SENATORSKY
	M. SCHEREC
	S. PYTKO

**Editors:**

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

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

Registration certificate ПИ 1 ФС 77-21137,  
May 19, 2005 Free price.

## CONTENTS

### *Tribological testing and tribodiagnostics*

**Semenov A.P.** Peculiarities of hardness measurement at super-low loads of diamond and diamond-like coatings ..... 3

**Beziatichny V.F., Zamyatin V.J., Zamyatin A.J.** Analytical application for test tools for definition of friction-fatigue characteristics of friction surfaces ..... 13

### *Tribological materials technology and technology*

**Chertovskih S.V., Shuster L.Sh., Stolyarov V.V.** Tribotechnical characteristics of nanostructured alloy Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub> processed by electroplastic deformation ..... 17

### *Lubricants and addition agents*

**Tesakova M.V., Parfenyuk V.I., Godlevskiy V.A.** The tribotechnical characteristics of lubricating compositions on basis of ultra dispersed copper containing powders obtained by electrochemical method ..... 22

**Dodonova D.A., Pichugin V.F., Laptev D.V.** Study of anti-friction and wear-resistant properties of aluminum-containing lubricant composition ..... 27

### *Calculation, designing and friction units operation*

**Mackushin A.A., Kulakov A.T., Denisov A.S.** The pressure losses in a engine crankshaft oil duct analysis ..... 34

**Vukolov L.A.** The brake shoes of higher capacity for work ..... 41

**Shevtsov S.N., Sayko I.B., Klimenko A.A., Ovechkin I.V.** Combined bearing block ..... 44

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.

## Особенности измерения твердости при сверхмалых нагрузках алмазных и алмазоподобных покрытий\*

*Проанализированы особенности измерения твердости (нанотвердости) при сверхмалых нагрузках традиционным способом и методом "кинетической твердости". Объяснены две аномалии при измерении твердости алмазных и алмазоподобных покрытий (упругий прогиб покрытий и фазовые превращения в процессе внедрения с увеличением объема).*

*Peculiarities of hardness measurement at super-low loads by traditional and "kinetic" hardness methods are analyzed. Two anomalies of hardness measurement of diamond and diamond-like coatings (elastic bending and phase transformation in process of indentation with increase of volume) are explained.*

**Ключевые слова:** твердость (нанотвердость), алмазные и алмазоподобные покрытия, упругий прогиб, фазовое превращение.

**Key words:** hardness (nanohardness), diamond and diamond-like coatings, elastic bending, phase transformation.

Твердость в техническом понимании слова – сопротивление пластической деформации материала при сложном напряженно-деформированном состоянии, создаваемом внедрением инденторов специальной формы. Измеряют значение твердости в МПа ( $\text{кгс}/\text{мм}^2$ ) – это деление приложенной к индентору нагрузки на условную площадь боковой поверхности отпечатка [1] или на площадь проекции отпечатка, форма которого зависит от геометрии применяемого индентора.

Твердость очень тонких поверхностных слоев трущихся деталей является в трибологии весьма важной характеристикой материалов. Работоспособность поверхностей трения деталей машин и инструментов (режущих и

деформирующих) зависит от механических свойств их тончайших поверхностных слоев. Единственным доступным способом достоверной оценки этих свойств является измерение твердости при очень малых нагрузках – микротвердость [1].

С развитием современных методов нанесения тонких покрытий и модифицирования поверхностных слоев (вакуумными ионно-плазменными методами, имплантацией, обработкой лазером) и расширением работ по наноматериалам и нанотехнологиям появилась потребность в измерении твердости при еще более низких нагрузках, что возможно при применении традиционных микротвердомеров. Возникла необходимость разработки методов и приборов для измерения субмикротвердости и нанотвердости.

Наиболее широко применяется традиционный метод измерения твердости по размеру восстановленного (остаточного) отпечатка после снятия нагрузки. В последние десятилетия все большее внимание уделяется методу, основанному на измерении твердости по глубине невосстановленного отпечатка при непрерывном вдавливании индентора в исследуемый материал с записью зависимости перемещения индентора от нагрузки. Это метод "кинетической твердости" [2, 3], или *наоиндентирования* [4, 5].

В настоящее время в публикациях, особенно зарубежных, чаще применяется второе название. Трудности (особенности) измерения твердости этим методом будут рассмотрены ниже. Вероятно, из-за них основное внимание исследователей, применяющих метод наоиндентирования, обращено не на измерение твердости, а на "извлечение" из

\* Работа выполнена по проекту РФФИ № 08-08-00257-а.



записанных диаграмм нагрузка–перемещение индентора других механических свойств в нанобъемах.

### **Инденторы, применяемые при измерении микро- и нанотвердости**

Наиболее часто для измерения твердости при малых нагрузках применяют четырехгранную квадратную пирамиду Виккерса. Основной ее недостаток заключается в практической невозможности изготовить пирамиду с острой вершиной (обычно она имеет крышеобразную форму или перемычку).

Такой же недостаток характерен и для пирамиды Кнуппа, имеющей форму четырехгранной пирамиды с ромбическим основанием. К преимуществу ее относится больший размер измеряемой диагонали ромбического отпечатка и меньшая, чем у пирамиды Виккерса, глубина отпечатка при той же нагрузке, что позволяет измерять микротвердость более тонких слоев материалов.

Часто при измерении твердости при очень малых нагрузках применяют трехгранную пирамиду Берковича. Сама технология ее изготовления обеспечивает теоретически получение идеально заостренной вершины пирамиды.

Из сказанного выше следует, что для измерения твердости при очень малых нагрузках (супермикротвердости и нанотвердости) из применяемых инденторов наиболее подходит трехгранная пирамида Берковича. Однако более перспективным является применение инденторов с заостренным ребром, поверхности которых образованы пересечением двух цилиндрических (бицилиндр) или конических поверхностей. В процессе изготовления таких инденторов образуется идеально острое деформирующее ребро, обеспечивающее получение удлиненных отпечатков. Такие инденторы при больших радиусах образующих их поверхностей (стандартизован радиус 2 мм) обеспечивают получение удлиненных линзообразных отпечатков, измерять которые можно с более высокой точностью, чем отпечатки трехгранной пирамиды Берковича.

Все названные выше инденторы изготавливают из самого твердого материала – природного алмаза, что позволяет измерять твердость любых материалов. Однако при внедрении их в алмаз, алмазные и алмазоподобные покрытия, имеющие такую же или близкую к алмазу твердость, на вершину индентора действуют удельные нагрузки, равные твердости самого алмаза (до 10000 кгс/мм<sup>2</sup>). Это деформирует индентор и приводит к затуплению его острия. В данном случае происходит измерение твердости методом совместного деформирования алмаза индентора и покрытия [6, 7].

При определении твердости по восстановленным отпечаткам (достаточно больших размеров) затупление и крышеобразность при внедрениях индентора в исследуемый материал мало влияют на измеряемые значения твердости.

Иначе обстоит дело при определении твердости при очень малых нагрузках и, особенно, при оценке твердости по глубине внедрения индентора. Исходная крышеобразность (перемычка) вершины алмазного индентора или ее искажение в результате предшествующего внедрения в материал с такой же твердостью не позволяют точно установить момент касания индентора с исследуемой поверхностью и получить надежные значения твердости при очень малых нагрузках.

### **Методические особенности измерения твердости при малых и сверхмалых нагрузках**

Измерения твердости при малых и сверхмалых нагрузках вызывают трудности, связанные как с аппаратурой и методиками измерения, так и с особыми свойствами поверхностных слоев и тонких покрытий, создаваемых современными технологиями. В первую очередь следует сказать о трудностях метрологического характера, вызванных отсутствием приборов, на которых с достаточной точностью можно прикладывать к индентору чрезвычайно малые нагрузки (десятые и сотые доли миллиграмма)



и измерять размеры очень маленьких отпечатков (единицы и десятки нанометров).

Проиллюстрировать это можно следующим примером. Предположим, что требуется измерить нанотвердость материала с объемной твердостью порядка  $1000 \text{ кгс/мм}^2$ . На квадратный отпечаток со стороной  $10 \text{ нм}$  глубиной  $2 \text{ нм}$  ( $20 \text{ ангстрем}$ ) при этом должна действовать нагрузка  $1000/10^{10} \text{ кгс}$ , или  $0,1 \text{ мг}$ . Для материала с твердостью  $100 \text{ кгс/мм}^2$  при том же размере отпечатка потребуется нагрузка  $0,01 \text{ мг}$ . На современных твердомерах такие величины измерить практически невозможно. Кроме того, следует выполнять установленное при исследованиях микротвердости правило, что толщина объекта, твердость которого измеряется, должна быть не менее  $1,5$  диагоналей отпечатка, что соответствует десятикратной глубине внедрения индентора (в рассматриваемом примере более  $40 \text{ нм}$ ).

Необходимо также не забывать, что размеры радиусов атомов кристаллической решетки составляют несколько десятых долей нанометра, что ограничивает возможности измерения твердости поверхностных слоев и покрытий.

Одной из серьезных трудностей, которые необходимо преодолеть для получения надежных значений твердости, является влияние вибрации в процессе приложения нагрузки и вдавливания индентора. В обычных условиях полностью устранить вибрации практически невозможно. При очень малых нагрузках вибрации могут существенно влиять на измеряемые значения твердости, а также неизбежные воздушные и тепловые потоки.

При исследовании и измерении твердости обычно не учитывается влияние сил трения между испытываемым материалом и индентором. Предполагается, что трение во всех возможных случаях одинаково. Но это не соответствует действительности [8]: силы трения между гранями индентора и деформируемым материалом оказывают значительное влияние на напряженное состояние деформируемого

индентором материала и на форму и размеры получаемого отпечатка.

Экспериментально установлено, что при измерении твердости с помощью алмазного индентора специально очищенных поверхностей, активных по отношению к углероду металлов (титана, циркония, ниобия) наблюдалось налипание этих металлов на поверхность алмазной пирамиды [9]. Это свидетельствует о том, что адгезионная составляющая коэффициента трения между гранями алмазной пирамиды и испытываемым материалом при измерении твердости может быть очень большой [10]. В зависимости от условий испытаний (на воздухе, в вакууме или в контролируемой газовой атмосфере), подготовки поверхностей испытываемого материала и индентора, температуры величина коэффициента трения граней алмазного индентора о испытываемый материал может отличаться на порядок. От его величины зависит как напряженное состояние деформируемого индентором материала, так и размеры отпечатка, а следовательно, и измеряемые значения твердости.

При оценке микро- и нанотвердости, особенно при очень малых нагрузках, может играть значительную роль масштабный фактор. Многие исследователи наблюдали повышение твердости при уменьшении размера отпечатка (уменьшении приложенной нагрузки). Объясняли они это разными причинами: влиянием поверхности (действием поверхностного натяжения), структурными факторами и др.

Одной из возможных причин повышения регистрируемых значений твердости при уменьшении размера отпечатков (на которую не обращают внимания) является фактическое увеличение скорости деформации. При постоянной линейной скорости внедрения индентора в испытываемый материал истинная скорость деформации, равная отношению величины деформации в единицу времени к исходному размеру деформируемого объема, изменяется. В начальный период



вдавливания истинная скорость деформации велика. При углублении индентора в материал скорость деформации плавно снижается. Известно же, что сопротивление материала при увеличении скорости деформирования возрастает. Из этого следует, что регистрируемые при очень малых нагрузках высокие значения твердости должны при увеличении размера отпечатка снижаться.

При рассмотрении возможности определения твердости на наноуровне методами вдавливания индентора с измерением остаточного (восстановленного) отпечатка и "кинетической твердости" по глубине внедрения индентора следует учитывать, что в атмосферных условиях поверхности практически всех материалов покрыты оксидными и гидроксидными пленками, твердость которых весьма сильно отличается от твердости исследуемого материала. Не являются исключением даже оксидные керамики. Лишь на благородных металлах (да и то не на всех) такие пленки отсутствуют. Нет их и на поверхности алмаза, и алмазных и алмазоподобных покрытиях, так как оксиды углерода – газы. Однако нельзя исключить возможность образования на поверхности алмаза и алмазоподобных покрытий тончайших пленок графита, влияющих на трение по граням индентора [11].

Принципиальное значение для измерения твердости при сверхмалых нагрузках имеют исследования, выполненные Б.Н. Гейном [12]. С помощью растрового электронного микроскопа изучался процесс внедрения индентора (иглы из вольфрама) в монокристалл золота. При действии очень малых нагрузок под индентором наблюдалась лишь упругая деформация исследуемого материала, несмотря на то что удельные нагрузки многократно превышали обычно измеряемые значения твердости. При определенной нагрузке происходил своеобразный "прорыв" и начиналось обычное пластическое течение материала под индентором. В результате этого образовывался отпеча-

ток. Значения твердости при этом соответствовали измеряемым при обычных для метода микротвердости нагрузках.

Наблюдаемый эффект авторы [12] объясняли тем, что в очень малых объемах материала, в которых при вдавливании индентора возникает объемное напряженное состояние сжатия, отсутствуют дислокации и пластическая деформация происходит не может (прочность материала близка к теоретической). При возрастании нагрузки объем материала, в котором действуют высокие напряжения, увеличивается, и в его зону попадают имевшиеся в материале дислокации. При начале их движения происходит лавинообразное увеличение их количества и в результате этого образуется традиционный для измерения твердости пластический отпечаток.

Следует также принимать во внимание наличие поверхностного натяжения твердых тел, а также неуравновешенность атомных связей поверхности. При приложении нагрузки к поверхности в начальный момент в результате действия поверхностного натяжения возможен упругий прогиб поверхностного слоя без пластической деформации. Лишь после преодоления сопротивления поверхностного натяжения происходит "прорыв" поверхностного слоя и начинается пластическое течение материала. Вероятность такого эффекта можно косвенно проиллюстрировать известным детским "фокусом" по плаванию на поверхности воды стальной иглки.

Принимая во внимание сказанное выше и упругую деформацию в самом начале приложения нагрузки, образования остаточных отпечатков при приложении к индентору очень малых нагрузок может не происходить (а следовательно, и измерение значений традиционной твердости может оказаться невозможным). Поэтому более реалистично говорить об измерении нанотвердости (а терминологически более правильно сказать – микротвердости) с размерами отпечатков не менее десятков нанометров (миллимикрон).



Все сказанное выше создает трудности при измерении нанотвердости по размерам пластических отпечатков, получаемых при внедрении в материал инденторов обычной принятой формы для измерения твердости и микротвердости. Это относится к измерению твердости как по восстановленному отпечатку индентора, так и по глубине внедрения ("кинетическая твердость").

#### **Испытание материалов при непрерывном вдавлении индентора (или метод "кинетической микротвердости")**

Приборы и методики, разработанные для измерения микротвердости, для измерения твердости при очень малых нагрузках (нанотвердости) не пригодны. Разработка в Институте машиноведения АН СССР (и дальнейшее развитие в Институте металлургии АН СССР) метода измерения микротвердости при непрерывном вдавлении индентора с регистрацией глубины внедрения (так называемый метод "*кинетической твердости*") [2, 3, 13, 14] вселило надежду на возможность его применения для оценки твердости при очень малых нагрузках. В этом методе записывается диаграмма внедрения индентора (зависимость глубины внедрения от нагрузки) начиная от нулевой нагрузки. На самом же деле на современных приборах регистрируется не глубина внедрения индентора, а его общее перемещение.

Кроме величины непосредственного внедрения индентора в испытуемый материал в регистрируемую величину входит упругая деформация прибора и упругая деформация самого образца. Последняя составляющая зависит от модуля упругости испытываемого материала и размера образца (длины в направлении действия нагрузки и поперечного сечения). К этому следует добавить, что при обычно применяемом креплении образца на пластилине последний также дает определенный вклад в упругую (и остаточную) деформацию всей системы.

В статье [8] приведен анализ зависимости при наноиндентировании перемещения (глубины вдавливания) индентора в процессе приложения и снятия нагрузки. Показано, что упругая деформация включает в себя деформацию прибора и образца, а также восстановление формы отпечатка.

При очень малых нагрузках возникли проблемы, затрудняющие получение достоверных данных о твердости и механических свойствах поверхностных слоев. Основная трудность заключается в невозможности современными методами точно установить момент касания острия индентора с поверхностью исследуемого образца и вследствие этого – истинное положение начала координат на регистрируемой зависимости глубины вдавливания от нагрузки.

В статье [15] было показано, что именно при очень малых нагрузках (и глубинах внедрения индентора) ошибки оценки твердости максимальны. При недостаточно точном определении момента касания индентора с поверхностью при его внедрении в изотропный материал (соответствующего началу координат на диаграмме внедрения) можно при обработке записанной кривой получить как значительное снижение значений твердости, так и повышение. Лишь при увеличении размера отпечатка (нагрузки) значение твердости приближается к реальной величине. Отклонения от среднего значения тем больше, чем меньше нагрузка (глубина внедрения индентора).

Таким образом, к *основным недостаткам метода "кинетической твердости"*, о которых было подробно написано в статьях [8, 15], *следует отнести:*

- а) невозможность точно установить на записанной диаграмме момент касания индентора с поверхностью исследуемого образца и начало отсчета нагрузки и деформации;
- б) неправильный учет (или полный неучет) при вычислении значений твердости деформации всей системы (самого прибора и образца).



Все это приводит к неправильной оценке твердости, особенно при действии очень малых нагрузок. Ошибка при измерении двух очень малых (бесконечно малых) величин (нагрузки и деформации) в самый начальный момент вдавливания индентора может привести к очень большим ошибкам в оценке микротвердости. Наибольший вклад в ошибку дает неточность определения истинной глубины вдавливания (при вычислении по ней значений традиционной твердости ее величина входит в расчетное уравнение во второй степени).

Если при определении значения твердости упругую составляющую диаграммы нагрузка–глубина внедрения не вычитают, как это делали некоторые исследователи, то получаем не значение твердости в общепринятом значении этого термина, а условную величину, в которую входят не только глубина внедрения индентора, но и упругая деформация применяемого прибора и образца.

Таким образом, для вычисления истинной (традиционной) твердости по диаграмме приложенная нагрузка–глубина внедрения индентора следует из зарегистрированной кривой вычесть упругую деформацию всей системы, что потребует разработки специальной методики. По истинной же глубине внедрения индентора (под действием нагрузки), равной одной пятой стороны квадратного отпечатка, можно вычислить значение традиционной твердости делением приложенной нагрузки на 25-кратную величину истинной глубины внедрения индентора в испытываемый материал.

### **Специфические эффекты при измерении нанотвердости алмазоподобных покрытий**

1. Одна из особенностей измерения твердости очень тонких твердых покрытий, в первую очередь наносимых вакуумными ионно-плазменными технологиями алмазных и алмазоподобных, заключается в том, что *они в начальный период приложения нагрузки к индентору могут упруго прогибаться без образования отпечатка.*

Возможность такого эффекта следует из представлений С.И. Журкова об аномальной прочности тонких аморфных стеклянных нитей, выдерживающих без разрушения громадные (для стекла) упругие деформации. Он объяснял это отсутствием на поверхности таких нитей дефектов, в частности трещин Гриффитса, являющихся концентраторами напряжений (вызывающих разрушение хрупких материалов).

Это справедливо также и для очень тонких пленок, находящихся как в свободном состоянии, так и на поверхностях других материалов.

Процесс образования покрытий вакуумными ионно-плазменными методами, осуществляемый на атомном уровне, исключает возможность образования дефектов, подобных трещинам Гриффитса и дислокациям. Такие покрытия подобны по свойствам тонким стеклянным нитям. При приложении нагрузки к ним индентором они сначала могут упруго прогибаться без пластической деформации. Лишь после определенного прогиба начинает образовываться пластический отпечаток.

Наибольшая возможность упругого прогиба при приложении нагрузки у аморфных  $a$ -С алмазных (алмазоподобных) безводородных покрытий и  $ta$ -С с тетраэдрической структурой, нанесенных на материалы с меньшим модулем упругости. Именно для таких тонких покрытий, имеющих очень высокие твердость и модуль Юнга, упругий прогиб на основании с меньшим модулем упругости наиболее реален. Содержащие водород покрытия  $a$ -С:H, имеющие существенно меньшие значения модуля упругости и твердости, менее подвержены проявлению этого эффекта.

Упругий прогиб твердых покрытий, нанесенных на другой материал, наиболее вероятен, если модуль упругости основы значительно меньше, чем модуль упругости покрытия. Приведенная ниже таблица содержит значения модуля упругости алмаза и ряда наиболее применяемых в технике металлов.





Сї à-áí èÿ ì î äöëÿ õĩ ðóã ñèè àèì àçà  
(è àèì àçí ù õ ï ï èðù òèè) è ðÿàà ì àòàèèí à

Материал	Модуль упругости, кгс/мм <sup>2</sup>
Алмаз	90 000
Твердые сплавы	48 000...66 000
Стали	21 000
Титан иодидный	9 950...10 900
Титан магниетермический	11 200...14 500
Железо	21 000
Медь	13 200
Алюминий	7 100

Из таблицы следует, что модуль упругости алмаза (и алмазоподобных покрытий со структурой алмаза) в несколько раз больше модуля упругости широко применяемых металлов (железа и сталей в 4,5 раза, титана в 10 раз, алюминия почти в 13 раз). Алмазоподобные покрытия на этих металлах при приложении нагрузки к индентору должны до начала пластической деформации упруго прогибаться на податливой основе, т.е. вести себя подобно упругой мембране, зажатой по периметру.

При измерении твердости тонких твердых покрытий вероятность прогиба пленки на упругом основании особенно велика при применении инденторов Виккерса и Берковича с затупленной вершиной и индентора Кнуппа. В самом начале приложения нагрузки к индентору покрытие прогибается на упругодеформируемом основании. После превышения определенной нагрузки начинается (одновременно или последовательно) пластическая деформация, как покрытия, так и материала основы. Приложенная нагрузка будет при этом восприниматься не только площадью пластического отпечатка, но и периферийной зоной, на которой имеет место упругий контакт индентора с поверхностью покрытия. В этом случае при оценке твердости по восстановленному отпечатку значения твердости должны оказаться завышенными. По-види-

мому, именно этим (или методической ошибкой) можно объяснить полученные некоторыми авторами [16] значения твердости алмазного покрытия около 30000 кгс/мм<sup>2</sup> (при твердости природных алмазов, из которых изготовлены инденторы, не более 10000 кг/мм<sup>2</sup>). При применении пирамиды Кнуппа отпечаток вообще не образовывался. Из приведенных результатов следует, что авторы [16] измеряли твердость покрытия сильно затупленными инденторами и не учитывали возможный прогиб покрытия.

При применении традиционного метода измерения твердости алмазного и алмазоподобного покрытия по размеру восстановленного отпечатка при малых нагрузках (даже при применении идеально заостренных инденторов) в результате упругого прогиба покрытия отпечаток не будет образовываться. При больших нагрузках после начала образования отпечатка измеренные значения твердости могут быть завышенными вследствие того, что часть приложенной нагрузки при индентировании воспринималась зоной упругого контакта индентора с поверхностью образца.

При определении твердости алмазного и алмазоподобного покрытий методом непрерывного вдавливания с записью диаграммы нагрузка—глубина внедрения начальный участок записи будет соответствовать лишь упругому прогибу покрытия без образования отпечатка. При обработке зависимостей нагрузка—деформация, записанных при испытании алмазоподобных покрытий, вычитанием упругой деформации (зафиксированной в процессе снятия нагрузки) из общей начальный участок зависимости должен трансформироваться в прямую линию, совпадающую с осью ординат. Понятие "твердость" в общепризнанном значении этого термина до начала пластической деформации покрытия не имеет смысла.

Лишь после превышения нагрузки, при которой начинается пластическая деформация покрытия, зависимость начинает отклоняться от оси ординат (плавно или скачком). После начала пластической деформации основы ха-



рактически характер зависимости опять изменяется. При больших глубинах вдавливания индентора (значительно превышающих толщину покрытия) записываемая кривая после обработки (вычитания упругой деформации) постепенно должна сближаться с зависимостью, характерной для деформирования материала основы без покрытия.

2. В основе второй особенности исследования методом наноиндентирования алмазных и алмазоподобных покрытий, наносимых вакуумными ионно-плазменными технологиями, лежит *метастабильность их структуры* [17, 18]. Такие покрытия представляют собой неравновесные системы, могущие релаксировать уже в течение процесса нанесения, при их хранении при комнатной температуре, а тем более при повышенных температурах. Превращение метастабильных фаз с  $sp^3$ -связями между атомами в графит с  $sp^2$ -связями происходит при этом с существенным (в 1,5–2 раза) увеличением объема. Покрытие под действием напряжений сжатия, возникающих в нем при графитизации, может даже распадаться в порошок. Графитизация покрытий с  $sp^3$ -связями между атомами углерода может происходить как на воздухе при атмосферном давлении, так и в глубоком вакууме.

Большая свободная энергия, накопленная в покрытиях в процессе образования, может быть причиной даже взрывного превращения их в графит [17] при инициировании в какой-либо локальной точке покрытия, например, электрическим пробоем, лучом лазера или ионным пучком и, наконец, деформацией и трением.

В результате действия высоких давлений и интенсивной пластической деформации при вдавливании индентора в метастабильное алмазоподобное покрытие (наноиндентировании) в объеме деформируемого индентором материала может происходить превращение  $sp^3$ -связей в более метастабильную структуру с  $sp^2$ -связями (графит). В результате того, что объем графита больше объема исходного ма-

териала покрытия, происходит замедление внедрения индентора в покрытие и в предельных случаях даже подъем индентора над исходной поверхностью покрытия. В этом случае после вычитания упругих деформаций всей системы зафиксированная на диаграмме остаточная глубина внедрения индентора окажется меньше ожидаемой (а в предельных случаях даже отрицательной).

Возможность проявления двух приведенных выше эффектов следует учитывать при измерении твердости алмазных и алмазоподобных покрытий, содержащих большое количество  $sp^3$ -связей между атомами углерода, особенно при применении метода наноиндентирования с записью диаграммы нагрузка–внедрение (или перемещение) индентора.

### Выводы

1. Трудности измерения твердости при очень малых нагрузках обусловлены отсутствием надежных способов и приборов, на которых можно прикладывать очень малые нагрузки и измерять отпечатки очень малых размеров (единицы и десятки нанометров). Особенно это относится к оценке твердости по диаграммам нагрузка–внедрение индентора.

2. При изготовлении инденторов типа пирамид Виккерса и Кнуппа практически невозможно получить эти пирамиды с идеально заостренными вершинами (обычно вершины таких инденторов имеют крышеобразную форму или перемычку). Это искажает форму отпечатка и при измерении твердости, особенно по глубине вдавливания индентора (метод "кинетической твердости"), приводит к получению неправильных значений твердости.

3. При измерении твердости при очень малых нагрузках следует применять инденторы с идеальным острием (трехгранная пирамида Берковича) или идеально острым ребром (поверхности индентора образованы пересечением двух цилиндрических или конических поверхностей).



4. При измерении твердости при очень малых нагрузках следует учитывать влияние на измеряемые значения твердости:

- наличия на поверхностях графитизированных, а также оксидных и гидрооксидных пленок;
- трения между гранями алмазного индентора и испытываемым материалом (в зависимости от условий значения коэффициента трения могут отличаться на порядок);
- значительных "истинных" скоростей деформаций в начальный период внедрения индентора.

5. При внедрении индентора под воздействием очень малых нагрузок в объеме материала, в котором отсутствуют дислокации, сначала возможны только упругие деформации, достигающие по величине теоретических значений без образования остаточного отпечатка. По-видимому, в этом же направлении действуют поверхностное натяжение и этим же можно объяснить отсутствие в поверхностном слое дефектов типа трещин Гриффитса (в покрытиях, наносимых вакуумными ионно-плазменными методами) на атомном уровне.

6. При вычислении значений твердости традиционным методом (по приложенной нагрузке и общему перемещению индентора) определяется не твердость в общепринятом понимании этого слова, а некоторая условная величина, характеризующая не только свойства материала, но и упругую деформацию всей системы (прибора, образца), зависящую от конструкции прибора, а также размеров и модуля упругости материала образца.

7. При вычислении значений "кинетической твердости" по значениям приложенной нагрузки и общего перемещения индентора определяется не твердость в общепринятом понимании этого слова, а некоторая условная величина, характеризующая не только свойства материала, но и упругую деформацию всей системы (прибора, образца), зависящую

от конструкции прибора, а также размера и модуля упругости материала образца.

8. При определении значений твердости при очень малых нагрузках (наноиндентировании) по записанным экспериментальным зависимостям нагрузка–глубина внедрения индентора велика возможность ошибки, вызванной неточным определением начала координат (соответствующего моменту касания индентора с поверхностью испытываемого материала). Незначительные ошибки (практически неизбежные) могут привести даже для изотропного материала к получению при приближении к поверхности ошибочных значений твердости (как значительного увеличения, так и снижения).

9. При наноиндентировании на диаграмме нагрузка–глубина вдавливания регистрируется не "истинная" глубина внедрения, а общее перемещение индентора, в которое входят также упругие деформации всей системы (прибора и образца). Для определения значений твердости по записанным диаграммам нагрузка–глубина внедрения (точнее, перемещение) индентора следует вычесть все паразитные упругие деформации, оставив лишь истинную глубину самого отпечатка. Это потребует разработки специальной методики построения зависимости истинной глубины отпечатка от нагрузки.

10. Оценивать твердость при малых и сверхмалых нагрузках (нанотвердость) целесообразно:

- при статическом методе – по размерам проекции восстановленного отпечатка, оставшегося после вдавливания индентора при заданной нагрузке;
- при методе "кинетической твердости" – по истинной глубине внедрения индентора.

Для квадратного отпечатка четырехгранной пирамиды Виккерса твердость равна отношению действующей нагрузки к 25-кратной глубине отпечатка (под нагрузкой).

11. При измерении методом "кинетической" твердости механических свойств и тра-



диционной твердости тонких покрытий с высоким модулем упругости (алмазных и алмазоподобных) на материалах с меньшим модулем упругости следует учитывать возможность значительных упругих прогибов покрытий до момента начала образования остаточного отпечатка. Это может существенно изменить характер зависимости нагрузка—глубина вдавливания индентора на начальном участке диаграммы и величины определяемых характеристик покрытия.

12. В наносимых вакуумными ионно-плазменными методами алмазных и алмазоподобных покрытиях, находящихся в метастабильном состоянии, возможен в процессе вдавливания индентора переход  $sp^3$ -связей между атомами углерода в  $sp^2$ -связи с полуторным увеличением объема материала под индентором, что при применении метода "кинетической твердости" приводит к искажению диаграммы нагрузка—перемещение индентора.

#### Библиографический список

1. ГОСТ 9450–76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. М.: 1976; ГОСТ 10717–75. Приборы для измерения микротвердости. М.: 1975.
2. Булычев С.И., Алехин В.П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. М.: Машиностроение. 1990. 224 с.
3. Скворцов В.Н., Матвеевский Р.М. Развитие метода испытания на микротвердость // Трение и износ. 1990, Т. 11. № 6. С. 1133–1137.
4. Головин Ю.И. Наноиндентирование как средство комплексной оценки физико-механических свойств материалов в субмикрообъемах (обзор) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. Т. 75. № 1. С. 45–59.
5. Головин Ю.И. Исследование механических свойств материалов методами наноиндентирования (обзор) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. Т. 75. № 2. С. 37–52.
6. Atkins A.G., Tabor D. Mutual indentation hardness apparatus for use at very high temperatures // British J. Appl. Phys. 1965. P. 16.
7. Хрущов М.М., Семенов А.П., Кацура А.А. Методика измерения твердости при высоких температурах совместным деформированием одноименных образцов / В кн.: Новое в области испытаний на микротвердость. М.: Наука. 1974. С. 132–137.
8. Семенов А.П. Измерение твердости при малых и сверхмалых нагрузках // Вестник машиностроения. 2008. № 5. С. 26–31.
9. Kurner K. Uber das Haften von Niob, Titan und Zirkonium an Hartenprufdiamanten // Zeitschrift fur Metallkunde. Band 52, Heft 12. 1962. P. 836–837.
10. Семенов А.П., Поздняков В.В., Лапшина В.А., Иоффе М.М. Адгезионное взаимодействие образцов алмаза с металлами // Доклады АН СССР. 1968. Т. 181. № 5. С. 1107–1110.
11. Семенов А.П. О трибологических свойствах алмаза и алмазоподобных покрытий // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2009. № 4. С. 11–13.
12. Gane V.N., Cox J.M. The Micro-hardness of Metals at very low Loads // Phil. Mag. 1970. V. 22. № 179. P. 881–891.
13. Калей Г.Н. Некоторые результаты испытаний на микротвердость по глубине отпечатка // Машиноведение. 1968. № 3. С. 105–107.
14. Хрущов М.М., Алехин В.П., Скворцов В.Н., Терновский А.П. О микромеханических испытаниях материалов путем микровдавливания // Заводская лаборатория. 1973. № 10. С. 1242–1244.
15. Семенов А.П. К методике измерения микротвердости тонких покрытий и модифицированных слоев вдавливанием индентора и царапанием // Трение и износ. 1994. Т. 15. № 5. С. 770–777.
16. Стрельницкий В.Е., Аксенов И.И., Вакула В.И. и др. О некоторых свойствах алмазоподобных углеродных покрытий, полученных конденсацией вещества из плазменной фазы // Письма в ЖТФ. 1978. Т. 4. Вып. 22. С. 1355–1358.
17. Бакай А.С., Стрельницкий В.Е. Структурные и физические свойства углеродных конденсатов, полученных осаждением потоков быстрых частиц (обзор) / М.: ЦНИИ-атоминформ. 1984. 87 с.
18. Вакула С.И., Стрельницкий В.Е. Влияние графитизации на свойства алмазоподобных углеродных покрытий // Сверхтвердые материалы. 1980. Вып. 4. С. 3–6.

*Контактные координаты автора*

Семёнов Александр Павлович — e-mail: semenov-imash@yandex.ru.



УДК 621.002.3:539.431

**В.Ф. Безъязычный**, д-р техн. наук (Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьева), **В.Ю. Замятин**, канд. техн. наук (Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург), **А.Ю. Замятин**, д-р техн. наук (ЗАО "Евразия Телеком холдинг", Москва), **Ю.П. Замятин**, канд. техн. наук (РГАТА им. П.А. Соловьева)

## Аналитическое приложение к испытательным средствам для определения фрикционно-усталостных характеристик поверхностей при их упругом контактировании

Рассмотрен алгоритм аналитической части системы расчетно-экспериментального определения основных параметров фрикционной усталости поверхностей трения при контактировании эталонного образца-индентора и исследуемой поверхности по схемам "плоскость – сфера" и "плоскость – цилиндр".

The algorithm of an analytical part of system for calculated-experimental definition of key parameters of frictional weariness of friction surfaces during contact of the reference sample-in-denter and an investigated surface under schemes "plane-sphere" and "plane-cylinder" is considered.

**Ключевые слова:** аналитическое приложение; определения; фрикционно-усталостные характеристики; поверхности трения.

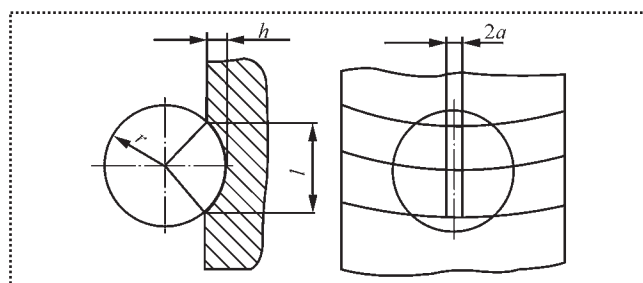
**Key words:** analytical application; definition; friction-fatigue characteristics; friction surfaces.

**В** [1] приведены сведения об устройстве и принципе действия разработанных в ГОУ ВПО "РГАТА им. П.А. Соловьева" циклометров, предназначенных для решения задач, связанных с исследованием закономерностей фрикционной усталости (ФУ) и определением численных значений параметров фрикционной усталости поверхностей применительно к схемам контактирования "сфера–плоскость" (рис. 1) и "цилиндр–плоскость" (рис. 2).

Для достижения необходимых триботехнических характеристик, прежде всего износостойкости, таких пар трения, как, например, зубчатое зацепление, "ролик толкателя–кулачок", "колесо–рельс", должен быть реализован упругий контакт отдельных

неровностей профиля. В связи с этим рассматриваемое аналитическое приложение разработано в соответствии со следующими положениями.

В соответствии с усталостной теорией износа [2, 3] принимается, что в начале упругого фрикционного взаимодействия поверхности сближаются на расстояние  $h_{r1}$  и входят в фактическое касание на площади  $A_r$ . Под действием возникающих на пятнах касания амплитудных фрикционных напряжений  $\sigma_{фУ}$  в материале наружного слоя каждой из контактирующих деталей накапливаются структурные изменения, микродефекты и микротрещины. После достижения в поверхностных микрообъемах материала некоторого критического количества микродефектов (за число циклов взаимодействия микронеровностей  $n_{r1}$ ) этот единичный слой толщиной  $h_{r1}$  отделяется от основы. Таким же образом за  $n_{r2}, \dots, n_{ri}, \dots, n_{rz}$  последующих циклов от основы отделяются единичные микрослои толщиной соответственно  $h_{r2}, \dots, h_{ri}, \dots, h_{rz}$  (рис. 3).



**Рис. 1.** Схема контактирования сферического индентора с плоским образцом после образования дорожки (желоба) трения-износа

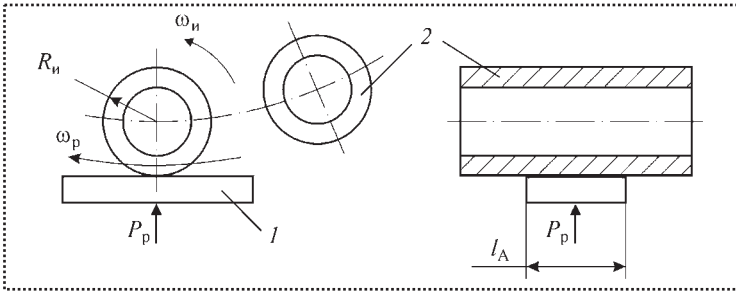


Рис. 2. Принятая схема взаимодействия испытуемого образца 1 и контр-образца-индентора 2

Будем считать, что за время испытаний  $t$  было реализовано  $N_{ц}$  циклов фрикционного взаимодействия контактирующих тел, т.е.:

$$N_{\delta} = n_{r1} + n_{r2} + \dots + n_{ri} + \dots + n_{rz} = z n_r \cdot (1)$$

За это время от контактирующих тел будет отделен слой материала, общая толщина которого будет равна сумме толщин единичных слоев, отделяемых в процессе изнашивания:

$$h_{N_{\delta}} = h_{r1} + h_{r2} + \dots + h_{ri} + \dots + h_{rz} = z h_r \cdot (2)$$

где  $h_r$  и  $n_r$  – соответственно средние значения толщин, отделяемых в процессе фрикционного взаимодействия единичных микрослоев материала, и числа циклов взаимодействия до их отделения.

Величина  $h_r$  может быть рассмотрена как текущее сближение контактирующих поверхностей, наибольшая высота микронеровностей которых оценивается величиной параметра  $R_{max}$  шероховатости.

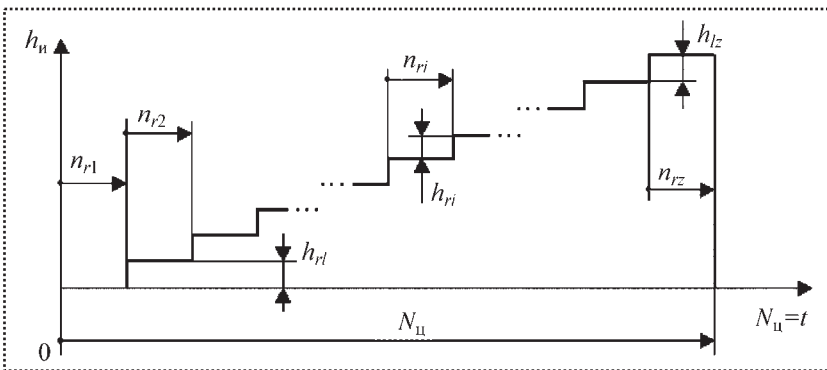


Рис. 3. Диаграмма идеализированного процесса усталостного разрушения поверхностей трения

Отсюда, для текущего изнашивания контактирующих тел в пределах фактической площади касания  $A_r$ , имеющей масштаб шероховатости, можно принять

$$h_r / h_{N_{\delta}} = n_r / N_{\delta} \cdot (3)$$

$$n_r = N_{\delta} h_r / h_{N_{\delta}} \cdot (4)$$

Таким образом, величины  $n_r$  и  $h_r$  имеют масштаб фактической площади касания. При сближении поверхностей на величину  $R_{max}$  износ и число циклов до усталостного разрушения приобретают масштаб номинальной площади касания  $A_a$ . Следовательно, в масштабе  $A_a$  выражение (4) представляется в виде

$$n_{\delta n} = N_{\delta} R_{max} / h_{N_{\delta}} \cdot (5)$$

Величина  $n_{yc}$  в (5) определяется экспериментально с помощью циклометра, описанного в [1], на образцах, взаимодействующих по схеме, показанной на рис. 2, и вводится в степенную функцию [2, 4]:

$$n_{\delta n} = (\sigma_0 / \sigma_{\delta \delta})^{t_y} \cdot (6)$$

где  $\sigma_0$  – условное контактное разрушающее напряжение, при котором отделение частиц изнашивания наблюдалось бы при одноактном взаимодействии тела и контр-тела;

$\sigma_{\phi y}$  – амплитудные (разрушающие) касательные напряжения, действующие на фрикционных связях и зависящие преимущественно от нормальной нагрузки, вида индентора, геометрических и физико-механических свойств контактирующих поверхностей, коэффициента трения  $f_{тр}$ ;

$t_y$  – показатель степени кривой фрикционной усталости при упругом (индекс "y") контактировании.



Таким образом, в уравнении (6) левая часть оказывается определенной.

Входящие в правую часть степенной функции (6) разрушающие напряжения  $\sigma_{\text{фв}}$  находят расчетным путем с использованием рекомендаций работы [4], представления гамма-функции в виде  $\Gamma(x) = \{e^{-x} x^{x-1/2} \sqrt{2\pi} \times [(1 + 1/(12x)) + 1/(288x^2)]\}$  [5] и приведенного в [4] соотношения:

$$\sigma_{\text{дó}} = 0,5 K_{\text{фв}} d_{\text{рy}} \sqrt{v} / (r \Theta), \quad (7)$$

где  $K_{\text{фв}}$  – коэффициент, зависящий от соотношения пределов прочности контактирующих материалов на разрыв  $\sigma_{\text{вр}}$  и сжатие  $\sigma_{\text{сж}}$ ;

$d_{\text{рy}}$  – средний диаметр пятен фактического касания взаимодействующих поверхностей;

$v = (v_1 + v_2)$  – приведенное значение параметра степенной аппроксимации описываемых уравнением  $t_p = b \varepsilon_p^v$  начальных участков опорных кривых поверхностей индентора 1 и испытываемого образца 2;

$b$  – приведенное значение параметров степенной аппроксимации  $b_1$  и  $b_2$  начальных участков кривых опорных поверхностей 1 и 2;

$r = [r_1 r_2 / (r_1 + r_2)]$  – средний приведенный радиус кривизны вершин контактирующих выступов поверхностей 1 и 2;

$\Theta = [(1 - \mu_1) / E_1 + (1 - \mu_2) / E_2]$  – приведенная упругая постоянная Кирхгофа;

$E_1, E_2$  и  $\mu_1, \mu_2$  – модули нормальной упругости и коэффициенты Пуассона материалов поверхностей 1 и 2.

Характеристики шероховатости  $v_1$  и  $v_2, r_1$  и  $r_2, R_{m1}$  и  $R_{m2}, b_1$  и  $b_2$  определяются с использованием разработанных в ГОУ ВПО "РГАТА им. П.А. Соловьева" автоматизированных профилографов-профилометров АПП-1 и АПП-2. Величины  $E_1$  и  $E_2$  определяют методом свободного ударного взаимодействия с помощью систем ПАУД-1, ПАУД-2 и ПАУД-3 также разработки ГОУ ВПО "РГАТА им. П.А. Соловьева". Коэффициент трения и величину износа определяют в процессе испытаний на циклометре.

После определения  $n_{yc}$  и  $\sigma_{\text{фв}}$  в уравнении (6) остаются две неизвестные величины –  $\sigma_0$  и  $t_y$ . Для их нахождения из одного уравнения степенная функция (6) путем логарифмирования преобразуется в уравнение прямой линии

$$\lg n_{\text{дн}} = t_y (\lg \sigma_0 - \lg \sigma_{\text{дó}}). \quad (8)$$

В зависимости от необходимой точности оценок с использованием (8) рассматривают несколько пар значений  $\lg \sigma_{\text{дó}}$ , обеспечиваемых при испытаниях варьированием, в основном, значений нормальной нагрузки, коэффициента трения  $f_{\text{тp}}$  (прежде всего, путем введения в зону контакта дозированных количеств различных смазочных материалов), а также  $v_1, v_2, r_1, r_2, R_{\text{max}1}, R_{\text{max}2}, b_1, b_2$ , и соответствующих им значений  $N_{\text{т}}$ . В принятых парах каждое левое уравнение делится на правое с получением, например, выражений:

$$\begin{aligned} \lg \sigma_{0(1)} &= \lg N_{\text{д}(1)} \lg \sigma_{\text{дó}(2)} - \\ &- \lg N_{\text{д}(2)} \lg \sigma_{\text{дó}(1)} / [\lg N_{\text{д}(1)} - \\ &- \lg N_{\text{д}(2)}], \\ \lg \sigma_{0(2)} &= \lg N_{\text{д}(1)} \lg \sigma_{\text{дó}(3)} - \\ &- \lg N_{\text{д}(3)} \lg \sigma_{\text{дó}(1)} / [\lg N_{\text{д}(1)} - \lg N_{\text{д}(3)}], \\ \lg \sigma_{0(3)} &= \lg N_{2\text{д}(2)} \lg \sigma_{\text{дó}(3)} - \\ &- \lg N_{\text{д}(3)} \lg \sigma_{\text{дó}(2)} / [\lg N_{\text{д}(2)} - \lg N_{\text{д}(3)}]; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} t_{y(1)} &= \lg N_{\text{д}(1)} / [\lg \sigma_{0(1)} - \lg \sigma_{\text{дó}(1)}], \\ t_{y(2)} &= \lg N_{\text{д}(2)} / [\lg \sigma_{0(2)} - \lg \sigma_{\text{дó}(2)}], \\ t_{y(3)} &= \lg N_{\text{д}(3)} / [\lg \sigma_{0(3)} - \lg \sigma_{\text{дó}(3)}]. \end{aligned} \quad (10)$$

Исходя из полученных по (9) и (10) единичных результатов, определяются средние величины  $\sigma_{0(\text{cp})}$  и  $t_{y(\text{cp})}$ , а также с заданной надежностью (уровнем значимости ошибки) их доверительные интервалы.

Применительно к модели испытания "сфера–плоскость" может быть использован упрощенный метод. В этом случае в процессе фрикционного взаимодействия со сфера-



ми-инденторами образец изнашивается и на нем образуется желобообразная дорожка трения-износа, поперечное сечение которой (см. рис. 1) имеет вид части окружности с хордой  $l$  и высотой  $h$ , количественно характеризующими износ образца. Номинальная текущая площадь касания индентора с образцом имеет значение  $2a$ .

Длина хорды  $l$  и глубина дорожки трения-износа (желоба)  $h$  представляются степенными функциями [6, 7]

$$l = c N_0^X, \quad h = m N_0^Y. \quad (11)$$

Значения коэффициентов  $c$ ,  $X$ ,  $m$ ,  $Y$  определяются методом наименьших квадратов по результатам испытаний на циклометре.

Из полученных опытных данных следует, что

$$t = (6 - 4X) / Y. \quad (12)$$

Для оценки параметра  $\sigma_0$  используется соотношение [2, 8, 9]

$$\sigma_0 = k f_{\infty} p_r. \quad (13)$$

В (13) коэффициент  $k$  и фактическое нормальное давление на контакте  $p_r$  при  $N_u = 1$  и  $h_{ж} = m$  определяют по формулам

$$k = 1,5 \{ 4 (1 - \mu - \mu^2) + (1 - 2\mu)^2 / f_{\infty} \}^{0,5}, \quad (14)$$

$$p_r = r^{-1} \left( \frac{P_p}{2\pi \theta \arccos(1 - h/r)} \right)^{0,5}, \quad (15)$$

где  $P_p$  – нормальная рабочая нагрузка на контакт;

$r$  – радиус кривизны сферического индентора.

Результаты практического использования изложенных методов при оценке рассмотренных параметров фрикционной усталости различных материалов свидетельствуют о их достаточно высокой производительности и точности.

### Библиографический список

1. Безъязычный В.Ф., Замятин Ю.П., Замятин А.Ю. и др. Циклометры для определения фрикционно-усталостных характеристик поверхностей трения // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2008. № 11. С. 10–16.
2. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
3. Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учеб. для технических вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше и др.; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.
4. Методика расчетной оценки износостойкости поверхностей трения деталей машин. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 100 с.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1974. – 932 с.
6. Ершов В.А., Замятин Ю.П. Метод исследования фрикционной усталости материалов // Заводская лаборатория. 1988. № 9. С. 96–99.
7. Замятин Ю.П., Ершов В.А. Методология изучения фрикционной усталости материалов при скольжении набором сфер // Трение и износ. 1989. Т. 10. № 4. С. 610–616.
8. Логинов А.Р. Метод оценки характеристик фрикционной усталости материалов // Исследования по триботехнике. – М.: НИИМАШ, 1975. С. 217–225.
9. Пинегин С.В. Контактная прочность и сопротивление качению. – М.: Машиностроение, 1969. – 243 с.

### Контактные координаты авторов

Безъязычный Вячеслав Феоктистович – тел. (4855) 22-20-91; E-mail: root@rgata.ru.

Замятин Владимир Юрьевич – тел. (812) 352-13-71; E-mail: vz\_2002@mail.ru; zvk@aari.nw.ru.

Замятин Александр Юрьевич – тел. (495) 957-11-11; E-mail: a\_tango@mail.ru.

Замятин Юрий Павлович – тел. (4855) 22-25-10; E-mail: root@rgata.ru.



УДК [669.295+620.18]:539.62

**С.В. Чертовских**, канд. техн. наук, **Л.Ш. Шустер**, д-р техн. наук (Уфимский государственный авиационный технический университет), **В.В. Столяров**, д-р техн. наук (Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН)

## Триботехнические характеристики наноструктурного сплава $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ , полученного электропластической деформацией\*

Приведены методика и результаты экспериментального исследования триботехнических характеристик наноструктурного никелида титана  $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ , полученного электропластической деформацией (ЭПД), в том числе адгезионных параметров (молекулярной составляющей коэффициента трения, прочности на срез адгезионных связей и др.) при различных температурах контакта и нагрузках. Установлено, что формирование нанокристаллической структуры в сплаве  $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$  повышает его прочностные характеристики, снижает адгезионную (молекулярную) составляющую коэффициента трения и уменьшает его склонность к схватыванию в процессе трения.

The method and results of an experimental research tribotechnical characteristics of nanostructured alloy  $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ , processed by electroplastic deformation, including adhesive parameters (a molecular component of factor of friction, durability on a cut of adhesive communications, etc.) is resulted, at various temperatures of contact and loadings. It is established, that formation of nanocrystalline structure in alloy  $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$  raises its strength characteristics, reduces an adhesive (molecular) component of friction coefficient and reduces his inclination to grasp during friction.

**Ключевые слова:** трение, триботехнические характеристики, наноструктурный никелид титана, адгезия, молекулярная составляющая коэффициента трения, температурно-силовые условия эксплуатации, электропластическая деформация, микроструктура.

**Key words:** friction, tribotechnical characteristics, nanostructured alloy  $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ , adhesion, molecular component of friction coefficient, temperature-power service conditions, electroplastic deformation, microstructure.

\* Работа выполнялась в рамках программ Рособразования (АВЦП – задание 2.1.2/385, госконтракт П340), а также при поддержке РФФИ (грант 08-08-00497).

$TiNi$ -сплавы с эффектом запоминания формы особенно в ультрамелкозернистом [1] и наноструктурном (НС) состояниях [2] обладают широким комплексом механических и функциональных свойств, таких как:

- биосовместимость;
- коррозионная стойкость;
- низкая плотность;
- высокая удельная прочность;
- память формы;
- сверхупругость;
- пластичность;
- высокая жаропрочность.

Однако триботехнические характеристики данных сплавов остаются практически неизученными. Ранее [3] выявлено существенное улучшение триботехнических характеристик сплава  $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$  в ультрамелкозернистом состоянии (с размером зерен 0,25...0,3 мкм), полученном методом равноканального углового прессования, по сравнению с крупнозернистым (КЗ) состоянием.

**Цель работы.** Данная статья посвящена изучению и сравнению триботехнических характеристик КЗ и НС (полученного электропластической деформацией) состояний никелида титана  $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$  в широком интервале температур и нагрузок.

**Методика проведения исследований.** В качестве исследуемого материала использовали сплав  $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$  в форме полосы  $2 \times 6 \times 150$  мм<sup>3</sup>, закаленный в воде после выдержки 0,5 ч при температуре 700 °С и имеющий крупнозернистую структуру аустенита (B2-фазы) со сред-

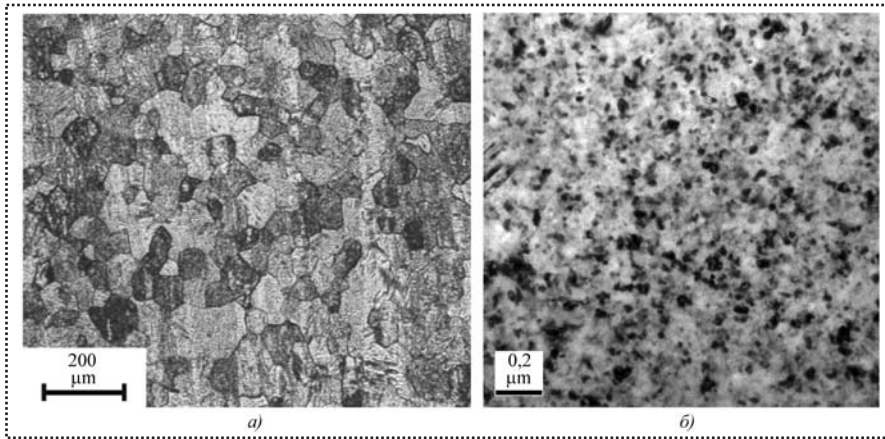


Рис. 1. Микроструктура сплава  $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$  после: а – закалки; б – ЭПД + отжиг

ним размером зерен 80 мкм. Содержание неметаллических включений в сплаве составляло около 3 %. Для измельчения структуры полосу подвергали электропластической деформации [2] до степени  $e = 1,54$  и последующему отжигу при 450 °С. Прокатку при комнатной температуре со скоростью 4 м/мин при минимальном разовом обжатии по толщине 25 мкм проводили на двухроликном стане, оборудованном генератором импульсного тока, который обеспечивает для труднодеформируемых сплавов электростимулирующее действие на технологическую пластичность сплавов [4].

Для подведения и съема тока использовали скользящий контакт (отрицательный полюс) до зоны деформации образца и один из валков (положительный полюс). Однополярный импульсный ток поступал от генератора с частотой импульсов  $10^3 \text{ с}^{-1}$ , длительность импульсов –  $0,8 \times 10^{-4} \text{ с}$ . Прокатку вели при постоянной плотности тока  $\sim 120 \text{ А/мм}^2$ . После каждого шага прокатки образцы охлаждали в воде, чтобы избежать влияния возможного нагрева. В результате была получена нанокристаллическая структу-

ра со средним размером зерен 80 нм.

Типичные виды микроструктур в поперечном сечении исходного (закаленного) и отожженного после ЭПД никелида титана представлены на рис. 1, а его механические свойства в этих состояниях – в табл. 1.

Согласно [5] активным фактором, определяющим схватывание трущихся поверхностей, является отношение тангенциальной

прочности  $\tau_n$  адгезионной связи на срез контактирующих в процессе трения тел и нормального напряжения на контакте  $p_r$ . Это отношение  $\tau_n / p_r$  является *адгезионной составляющей коэффициента трения*, от которого зависит глубинное деформирование приконтактных слоев.

Для оценки составляющих коэффициента трения в условиях пластического контакта:  $\tau_{in}$ ,  $p_{rn}$ ,  $\tau_{in} / p_{rn}$ ,  $\tau_0$  – *тангенциальной прочности адгезионных связей на срез в отсутствие нормальной нагрузки* и  $\beta$  – *коэффициента упрочнения адгезионных связей от действия нормальной нагрузки* применяли экспериментальный метод, описанный в работах [3, 5–8].

В качестве индентора использовали двусторонние сферические цилиндрики (радиусом 2,5 мм и высотой 25 мм) из твердосплав-

Таблица 1. Механические свойства сплава  $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$  в различных состояниях

Состояние	Характеристики				
	$d$ , мкм	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	HV, МПа
Исходное (закаленное)	80	600	940	40	275
ЭПД + отжиг	0,08	1 200	1 300	9,6	590

Обозначения:  $d$  – средний размер зерна;  $\sigma_{0,2}$  – предел текучести (условный) при допуске на величину остаточной деформации 0,2 % МПа (кгс/мм<sup>2</sup>);  $\sigma_B$  – предел прочности;  $\delta$  – относительное удлинение; HV – твердость.



ного инструментального материала ВК8 (8 % Со; 92 % WC). Данный материал выбрали исходя из его достаточно высоких жаропрочности и жаростойкости (до 850...900 °С). Это свойство ВК8 позволило оценить триботехнические свойства КЗ и НС никелида титана при повышенных температурах контакта. Сплав ВК8 предпочтительно применяется при механической обработке деталей из титана и его сплавов [4].

Образцы для исследований (пластинки размерами  $\approx 20 \times 20$  мм и толщиной 1...2 мм, закрепленные на стальные подложки диаметрами 15...20 мм и толщиной 5 мм) из сплава  $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$  исследовали в двух состояниях:

- ◆ КЗ (исходное закаленное);
- ◆ НС (после ЭПД + отжиг).

Все измерения трибологических характеристик для каждого состояния при комнатной и повышенных температурах были выполнены на одних и тех же образцах.

#### Результаты эксперимента и их обсуждение.

На рис. 2 приведены температурные зависимости параметров  $\tau_{in}$ ,  $p_{rn}$  и  $\tau_{in}/p_{rn}$ , полученные в условиях пластического контакта на образцах никелида титана, находящегося в разном структурном состоянии.

Из рис. 2, б видно, что сдвиговые напряжения  $\tau_{in}$  для всех состояний сначала возрастают, а затем уменьшаются с повышением температуры, однако их значения для НС никелида титана несколько выше, чем для КЗ его состояния. Нормальные напряжения  $p_{rn}$  с повышением температуры контакта для всех состояний исследуемых образцов также уменьшаются (рис. 2, в).

Из рис. 2, в видно, что предельные нормальные напряжения на контакте  $p_{rn}$ , соответствующие пластическому контакту, уменьшаются с повышением температуры для всех состояний вследствие разупрочнения материала, а измельчение структуры в нитиноле упрочняет его и существенно повышает предельные нормальные напряжения  $p_{rn}$ .

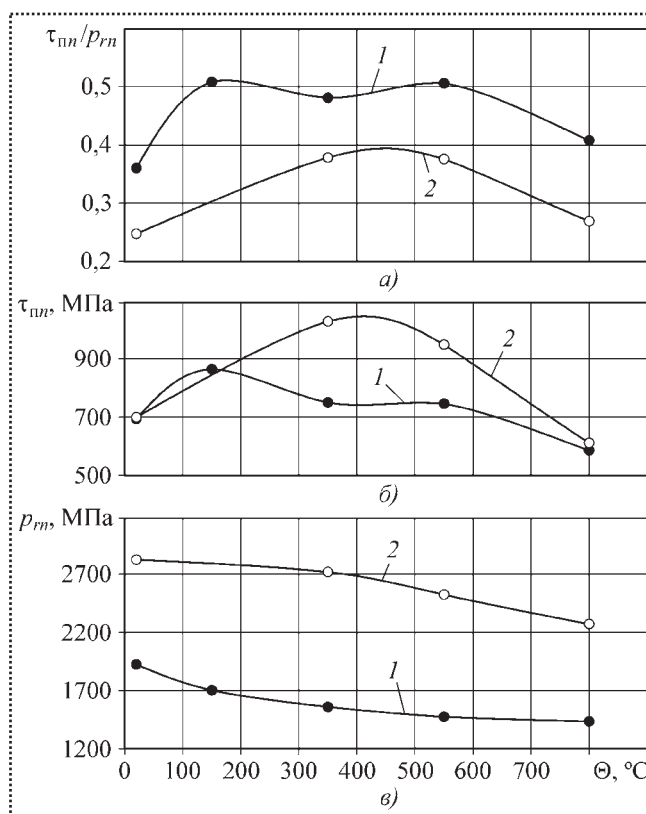


Рис. 2. Влияние температуры  $\Theta$  контакта на триботехнические характеристики фрикционного контакта  $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ : 1 – исходный – закаленный; 2 – после ЭПД + отжиг – ВК8:

*a* – молекулярную составляющую коэффициента трения  $\tau_{in}/p_{rn}$ ; *б* – прочность на срез адгезионных связей  $\tau_{in}$ ; *в* – нормальные напряжения на контакте  $p_m$

Определенное влияние на триботехнические характеристики НС материалов оказывают их физико-механические свойства. Известно [5], что предельные нормальные напряжения на контакте  $p_{rn}$  пропорциональны пределу текучести  $\sigma_T$  исследуемого материала. Предел текучести увеличивается не только за счет уменьшения размера зерна  $d$  (соотношение Холла-Петча), но и за счет создания методом ЭПД микроструктуры в металлах с наличием большеугловых неравновесных границ зерен (содержащих внеосные дислокации с плотностью  $\rho_{н.г.з}$ ):

$$\sigma_T = \sigma_0 + k_{Х-П} d^{-1/2} + M \alpha G b (\rho_{н.г.з})^{1/2}, \quad (1)$$



где  $\sigma_0$  – напряжение трения, действующее на движущиеся дислокации со стороны кристаллической решетки;

$k_{х-п}$  – постоянная, характеризующая способность границ передавать напряжение от зерна к зерну для данного материала (константа Холла-Петча);

$M$  – коэффициент Тейлора;

$\alpha$  – параметр междислокационного взаимодействия;

$G$  – модуль сдвига;

$b$  – вектор Бюргерса.

При наличии пластических деформаций на трибоконтакте прочность  $\tau_{in}$  адгезионных связей на срез прямо пропорциональна предельным нормальным напряжениям  $p_{rn}$  на контакте:

$$\tau_{in} = \tau_0 + \beta p_{rn}. \quad (2)$$

НС материалы имеют повышенную величину  $p_{rn}$ . Их неравновесные границы зерен обладают избыточной энергией, что приводит к увеличению  $\tau_{in}$  (по сравнению с КЗ состоянием). Но в результате инициирования трением процессов релаксации, возникновения вторичных структур на контакте прочность  $\tau_{in}$  адгезионных связей на срез может увеличиваться в меньшей мере, чем величина  $p_{rn}$  предельных нормальных напряжений. В результате этого адгезионная (молекулярная) составляющая коэффициента трения  $f_i = \tau_{in}/p_{rn}$  может снижаться [3, 7, 8], что и видно на рис. 2, а (значения  $f_m$  для НС никелида титана значительно ниже, чем для исходного КЗ нитинола). Температура  $\Theta$  контакта, изменяя значения  $\tau_{in}$  и  $p_{rn}$ , оказывает дополнительное влияние на величину коэффициента  $f_m$ .

Таким образом, при НС состоянии никелида титана по сравнению с КЗ состоянием (исходным) наблюдается улучшение трибо-

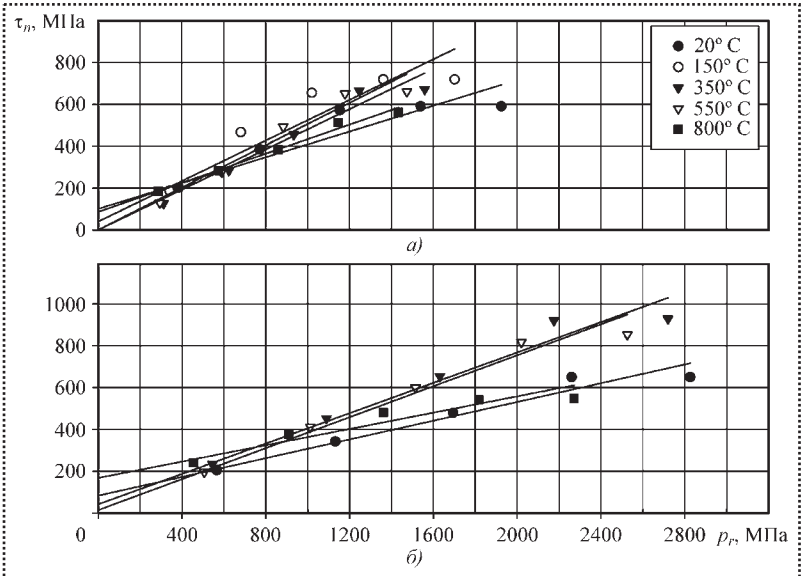


Рис. 3. Влияние контактного давления  $p_r$  на тангенциальную прочность  $\tau_n$  адгезионных связей при различных температурах контакта: а – Ti-50,7 % Ni (после закалки) – ВК8; б – Ti-50,7 % Ni (после ЭПД + отжиг) – ВК8

технических свойств (см. рис. 2, б), так как во всем исследованном диапазоне температур контакта  $\Theta$  (20...800 °С) повышается устойчивость материалов фрикционной пары к локальному сдвигу (в связи со снижением молекулярной составляющей коэффициента трения  $f_m$ ), т.е. уменьшается вероятность схватывания (сварки) контактирующих поверхностей.

Наши экспериментальные данные (рис. 3) подтвердили линейный характер зависимостей  $\tau_n = f(p_r)$  для фрикционных пар во всем исследованном диапазоне температур.

На рис. 4 представлены зависимости триботехнических параметров  $\beta$  и  $\tau_0$  от температуры фрикционного контакта. Видно, что коэффициент упрочнения адгезионных связей от действия нормальной нагрузки  $\beta$  ведет себя с увеличением температуры контакта аналогично адгезионной составляющей коэффициента трения: для всех структурных состояний испытуемых образцов сначала увеличивается, а затем снижается. При этом значения  $\beta$  для НС нитинола существенно меньше, чем для КЗ аналога.

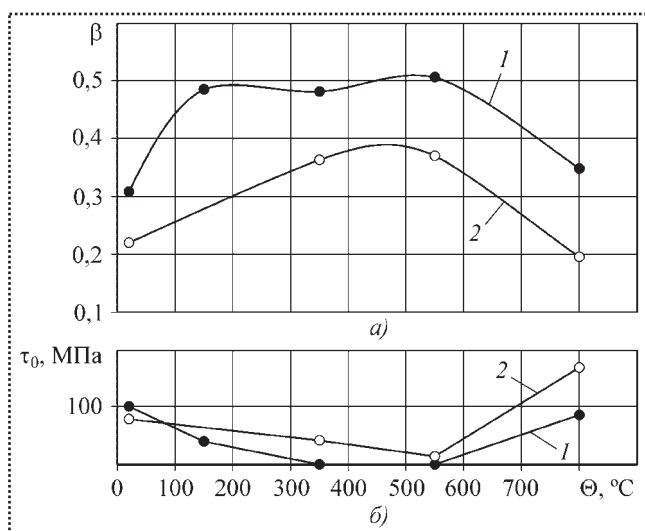


Рис. 4. Влияние температуры контакта на триботехнические параметры  $\beta$  (а) и  $\tau_0$  (б): 1 – Ti-50,7 % Ni (исходный закаленный) – ВК8; 2 – Ti-50,7 % Ni (после ЭПД + отжиг) – ВК8

Температурные зависимости параметра  $\tau_0$  для различных структурных состояний никелида титана (рис. 4, б) имеют тенденцию уменьшаться с повышением температуры  $\Theta$  контакта, и лишь при высоких температурах (800 °С) несколько возрастают. Но значения параметра  $\tau_0$  практически во всем температурном диапазоне для НС нитинола несколько выше по сравнению с КЗ TiNi, что также подтверждает наличие избыточной поверхностной энергии испытываемых материалов в связи с наличием неравновесных границ зерен.

### Вывод

Формирование нанокристаллической структуры в сплаве  $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$  повышает его прочностные харак-

теристики, снижает адгезионную составляющую коэффициента трения и уменьшает его склонность к схватыванию.

Полученные данные позволяют прогнозировать улучшение эксплуатационных характеристик при использовании НС никелида титана в трибосопряжениях деталей машин при различных температурно-силовых условиях работы, а также улучшение его обрабатываемости при механической обработке на стадии технологической подготовки производства.

### Библиографический список

1. Столяров В.В. Структурные особенности, механические свойства и эффект памяти формы в TiNi сплаве, полученном равноканальным угловым прессованием / В.В. Столяров, Е.А. Прокофьев, С.Д. Прокошкин, С.В. Добаткин, И.Б. Трубицына, И.Ю. Хмелевская, В.Г. Пушин, Р.З. Валиев // ФММ. 2005. Т. 100. № 6. С. 91–102.
2. Stolyarov V.V. Severe electroplastic deformation of TiNi alloy / V.V. Stolyarov, U.Kh. Ugurchiev, I.B. Trubitsyna, S.D. Prokoshkin, E.A. Prokofiev // Физика и техника высоких давлений. 2008. Т. 16. № 4. С. 64–67.
3. Чертовских С.В. Триботехнические свойства нитинола, полученного интенсивной пластической деформацией / С.В. Чертовских, Л.Ш. Шустер, В.В. Столяров // Трение и износ. 2005. Т. 26, № 1. С. 80–83.
4. Троицкий О.А. Физические основы и технологии обработки современных материалов (в 2-х томах), т. 1. / О.А. Троицкий, Ю.В. Баранов, Ю.С. Авраамов, А.Д. Шляпин. М. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004.
5. Шустер Л.Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел / Л.Ш. Шустер. Уфа: Гилем, 1999. 199 с.
6. Крагельский И.В. Узлы трения машин. Справочник / И.В. Крагельский, Ю.М. Михин. М.: Машиностроение, 1988. 280 с.
7. Чертовских С.В. Зависимость триботехнических характеристик титановых сплавов от дисперсности микроструктуры / С.В. Чертовских, Л.Ш. Шустер // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2008. № 12. С. 18–24.
8. Столяров В.В. Трибологическое поведение ультрамелкозернистых титановых сплавов / В.В. Столяров, Л.Ш. Шустер, С.В. Чертовских // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2006. № 10. С. 11–19.

### Контактные координаты авторов

**Чертовских Сергей Владимирович** – доцент кафедры "Основы конструирования механизмов и машин" Уфимского государственного авиационного технического университета; e-mail: sergeyvl@ugatu.ac.ru.

**Шустер Лева Шмульевич** – профессор кафедры "Основы конструирования механизмов и машин" УГАТУ; e-mail: okmim@ugatu.ac.ru.

**Столяров Владимир Владимирович** – профессор, главный научный сотрудник Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН; e-mail: vlstol@mail.ru.

УДК 544.6+531.43

**М.В. Тесакова** (Институт химии растворов РАН, г. Иваново), **В.И. Парфенюк,**  
**В.А. Годлевский,** д-р техн. наук (Ивановский государственный университет)

## Триботехнические характеристики смазочных композиций на основе ультрадисперсных медьсодержащих порошков, полученных электрохимическим методом\*

Исследованы триботехнические характеристики смазочных композиций на основе ультрадисперсных медьсодержащих порошков, полученных электрохимическим методом. Показано, что введение ультрадисперсных медьсодержащих порошков в промышленные смазочные материалы улучшает триботехнические свойства основы: увеличивает предельная нагрузка задира и уменьшается коэффициент трения. Наибольшая эффективность добавок медьсодержащего порошка проявляется при больших нагрузках, близких к режиму сухого трения.

*The tribotechnical characteristics of lubricating compositions on basis of ultra-dispersed copper containing powders obtained by electrochemical method were investigated. It was shown that introduction of ultra dispersed copper containing powders into commercial lubricants improves tribotechnical properties of basis: the ultimate load of seizure increases and the friction coefficient decreases. Maximal efficiency of copper containing powders additions manifested by heavy load nearby of dry friction conditions.*

**Ключевые слова:** смазочные композиции, ультрадисперсные медьсодержащие порошки, триботехнические характеристики.

**Keywords:** lubricating compositions, ultra dispersed copper containing powders, tribotechnical characteristics.

Одним из способов улучшения полезных свойств пластичных смазочных материалов (ПСМ) является введение в их состав соединений меди [1]. В научной литературе ряд работ посвящено изучению влияния добавок:  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CuS}$ ,  $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CuO}$  [2],

$\text{Cu}_2\text{O}$  [1, 2],  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  [3], ультрадисперсного порошка меди, полученного плазменно-конденсационным методом [4], – на антифрикционные свойства пластичных смазочных материалов.

Согласно [1–6] практически любые медьсодержащие добавки улучшают антифрикционные свойства основы за счет образования на поверхности трения тонкой медной пленки. Л.И. Погодаевым и др. [7] выполнены комплексные исследования влияния добавок к пластичной смазке "Литол-24" тонкодисперсных порошков цинка, кадмия и бронзы на износостойкость и триботехнические свойства пар трения. Выявлено, что наибольшее влияние на усилие схватывания оказывает цинк, содержащийся в смазочной композиции в количестве 10 масс. %. При таком же содержании кадмия наблюдается наибольшее критическое давление (критическое усилие разрушения смазочной пленки).

Действие смазочного материала, наполненного медью, по-видимому, основано на вдавливании ее частиц в неровности поверхности трения и размазывании их по ней (плакирование), в результате чего увеличивается фактическая площадь контакта, снижаются коэффициент трения и износ трущихся деталей [2].

В случае использования соединений меди пленка получается более эффективной вследствие того, что взаимодействие меди с поверхностью трения происходит в момент "трибовосстановления" [1]. При этом, соглас-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Минобрнауки и науки РФ (№ 2.1.2/4670)



но [1], наиболее эффективной добавкой является оксид меди.

В представленной работе в качестве металлоплакирующих добавок предлагается использовать ультрадисперсные медьсодержащие порошки (УМП) с размерами частиц менее 100 нм, полученные электрохимическим методом, который достаточно прост в применении, не требует использования дорогостоящих реактивов и оборудования, а также вакуума или атмосферы инертного газа, и очень высоких или, наоборот, очень низких температур.

Этот метод дает возможность управления процессом получения ультрадисперсных частиц путем варьирования таких условий, как состав и концентрация электролита и смешанного растворителя, значение катодного потенциала, плотность тока, время проведения процесса и т.д.

Авторами [8] установлено, что на процесс электрохимической кристаллизации медьсодержащих осадков существенное влияние оказывает тип растворителя. Введение органического растворителя в водные растворы электролитов позволяет получать порошки с размерами частиц менее 100 нм. Так, при добавлении органического растворителя в электролит происходит изменение распределения по размерам частиц медьсодержащего порошка (в отсутствие органического растворителя ~ 70 масс. % частиц порошка имеют размер 1...5 мкм; с добавлением органического растворителя ~ 85 % частиц имеют размер менее 100 нм).

Цель настоящей работы – изучение возможности улучшения триботехнических свойств промышленных ПСМ путем введения в их состав электролитических УМП и оценка эффективности их применения по сравнению с промышленным медным порошком марки PRS (производство "Panreac", Испания). Объектами исследования служили пластичные смазочные материалы: "Шрус-4" (ТУ 0254-115-04001396–05), "Литол-24" (ТУ

0254-116-04001396–05), "Циатим-20" (ГОСТ 6267–74), "Графитная" (ГОСТ 3333–80), в которые добавляли медьсодержащие порошки.

### Экспериментальная часть

Ультрадисперсный медьсодержащий порошок получали методом электрохимического восстановления. Электрокристаллизацию меди проводили из растворов сульфата меди в смеси вода – изопропиловый спирт без принудительного перемешивания [9]. Электролиз проводили при поддержании постоянного напряжения на электродах при 25 °С. В качестве катода использовали стальной цилиндрический стержень, в качестве анодов – нерастворимые (оксидно-рутениево-титановые) пластины.

Для определения начальной величины плотности тока и концентрации водно-органического раствора электролита предварительно проводили поляризационные исследования катодного восстановления меди из водно-изопропанольных растворов сульфата меди.

Из анализа результатов поляризационных исследований установлены оптимальные концентрации изопропилового спирта и сульфата меди для электросинтеза медьсодержащих порошков с размером частиц менее 100 нм. Величина рабочей плотности тока подбиралась такой, чтобы процесс электролитического осаждения протекал в режиме предельной диффузии [8].

По окончании электролиза полученный осадок многократно промывали бидистиллированной водой до постоянного значения электропроводности промывных вод и высушивали до порошкообразного состояния с постоянным весом. Для определения формы и размера частиц полученных порошков применяли метод электронной микроскопии [10]. В работе использовали просвечивающий электронный микроскоп ЭМВ-100Л (ускоряющее напряжение до 100 кВ, разрешение 3 Å). Полученные цифровые изображения об-



рабатывали с помощью пакета программ для математических вычислений MATLAB. По результатам серии экспериментов строили эмпирические гистограммы распределения частиц по размерам. Химический состав полученных порошков определяли электрографическим, рентгенографическим и термогравиметрическим методами исследования.

Триботехнические свойства смазочных композиций оценивали по результатам лабораторных испытаний на машине трения модели СМЦ-2. В базовые ПСМ добавляли УМП и медный порошок PRS в концентрациях: 0; 1; 2; 5; 10; 20 масс. %. Композиции с порошком тщательно перемешивали и наносили на истирающий диск.

Каждый смазочный материал испытывали несколько раз для получения необходимого объема данных для статистической обработки. Испытания проводили по схеме "подвижный диск – неподвижный диск" при скорости скольжения 0,76 м/с. В качестве пары трения использовались диски незакаленной стали 45 диаметром 50 мм.

Осевые нагрузки на узел трения ступенчато изменяли от 138 Н до появления видимых признаков задира на трущихся поверхностях. Продолжительность одного испытания на каждой ступени нагружения составляла 2 мин. Регистрировали момент трения и нагрузку на образец.

### Обсуждение результатов

Совокупный анализ результатов электрографического, рентгенографического и термогравиметрического методов исследования позволяет сделать вывод, что в состав полученных порошков входят медь и ее оксиды:  $\text{Cu}_2\text{O}$  и  $\text{CuO}$ . В состав промышленного порошка PRS входит медь и незначительное количество оксида меди (II).

На рис. 1 приведены данные распределения частиц по размерам ультрадисперсного медьсодержащего порошка. По результатам анализа гранулометрического состава медьсодержащих порошков можно сделать за-

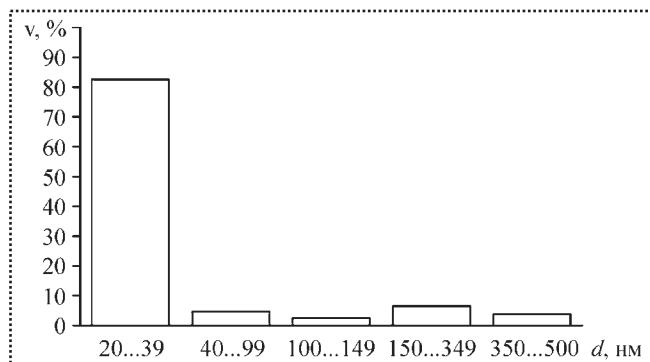


Рис. 1. Гистограмма процентного  $V$  распределения частиц по размерам  $d$  ультрадисперсного медьсодержащего порошка, полученного электрохимическим методом

ключение, что 85 масс. % частиц имеют размер менее 100 нм, число более крупных частиц составляет 15 % от общей суммы. Размеры частиц промышленного медного порошка PRS составляют от 0,3...228 мкм. Около 30 масс. % частиц порошка от общего количества имеют размер 20...35 мкм (рис. 2).

При добавлении в смазочные материалы как порошка PRS, так и УМП, в состав которого входят  $\text{Cu}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$  и  $\text{CuO}$ , поверхность трения была покрыта тонким слоем меди. Вероятно, медная пленка появляется не только за счет вдавливания медных частиц в микронеровности поверхности, но и в результате восстановления оксидов меди углеродом в процессе трения.

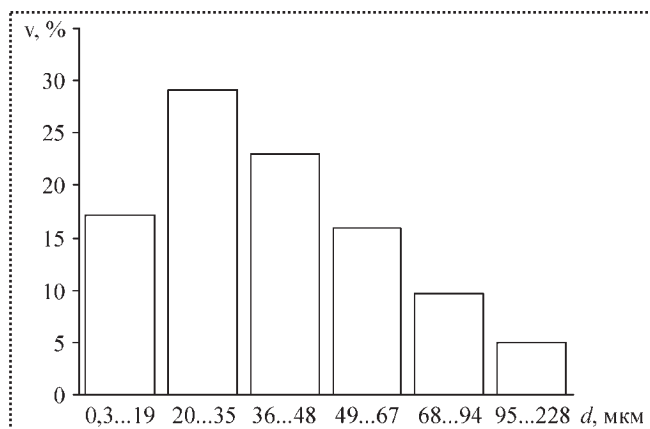


Рис. 2. Гистограмма процентного  $V$  распределения частиц по размерам  $d$  промышленного медного порошка PRS





Таблица 1. Концентрация порошка в смазочном материале, масс. %

Смазочный материал	Концентрация порошка в смазочном материале, масс. %					
	0	1	2	5	10	20
"Литол-24" + ультрадисперсный медьсодержащий порошок	0,276	0,304	0,345	0,428	0,552	0,718
"Литол-24" + медный порошок PRS		0,290	0,304	0,331	0,373	0,414
"Циатим-20" + ультрадисперсный медьсодержащий порошок	0,386	0,483	0,518	0,690	0,856	1,173
"Циатим-20" + медный порошок PRS		0,414	0,442	0,483	0,552	0,649
"Шрус-4" + ультрадисперсный медьсодержащий порошок	0,690	0,794	0,904	0,966	1,040	1,657
"Шрус-4" + медный порошок PRS		0,676	0,690	0,725	0,828	0,897
"Графитная" + ультрадисперсный медьсодержащий порошок	0,966	1,214	1,408	1,587	1,697	1,794
"Графитная" + медный порошок PRS		1,035	1,090	1,159	1,242	1,352

Было установлено, что введение УМП и порошка PRS улучшает триботехнические свойства основы (таблица)

При введении УМП в ПСМ "Литол-24" предельная нагрузка задира увеличилась в 2,6 раза по сравнению с основой. При введении медного порошка PRS предельная нагрузка задира увеличилась в 1,5 раза по сравнению с базовым материалом.

При введении УМП в ПСМ "Циатим-20" предельная нагрузка задира увеличилась в три раза, а при введении порошка PRS — в 1,7 раза по сравнению с базовым материалом.

При введении в ПСМ "Шрус-4" УМП предельная нагрузка задира увеличилась в 2,4 раза, а при введении порошка PRS — в 1,3 раза по сравнению с базовым материалом.

При добавлении УМП в ПСМ "Графитная" предельная нагрузка задира увеличилась в 1,9 раза, а при введении порошка PRS — в 1,4 раза по сравнению с базовым материалом (см. таблицу).

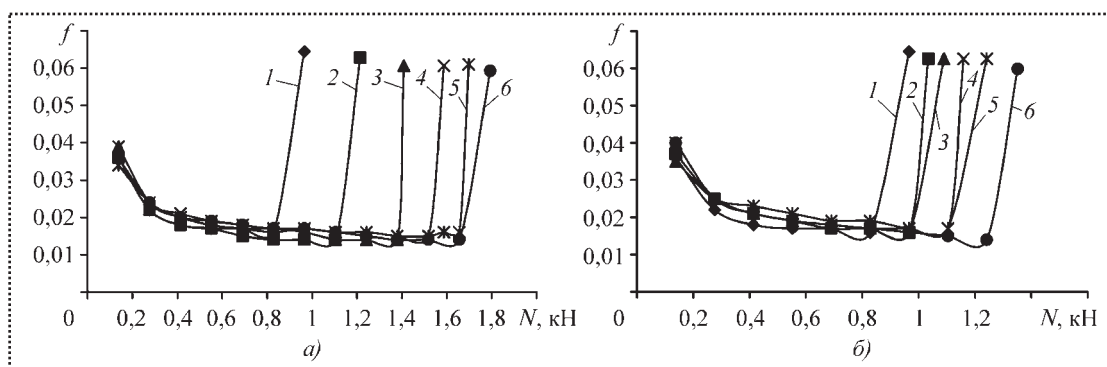
Таким образом, ультрадисперсные медьсодержащие порошки, полученные электрохимическим методом, значительно улучшают

антифрикционные свойства систем, независимо от состава базового ПСМ.

Порошок PRS также улучшает свойства систем независимо от базового смазочного материала, но в меньшей степени по сравнению с ультрадисперсным порошком.

На рис. 3 представлена зависимость коэффициента трения от нагрузки для ПСМ "Графитная" с добавками УМП. При небольших нагрузках коэффициент трения не изменяется при добавлении ультрадисперсного порошка к смазочному материалу. Коэффициент трения уменьшается по сравнению с чистым смазочным материалом при достижении нагрузки 966 Н. При добавлении порошка PRS, коэффициент трения также уменьшается при этой нагрузке. При использовании промышленного смазочного материала при нагрузке 966 Н происходит задиры (коэффициент трения резко возрастает).

Добавки порошков в ПСМ позволяют использовать исследованные пары трения при больших нагрузках, что невозможно при использовании промышленного ПСМ. Это говорит о том, что при небольших нагрузках



**Рис. 3. Зависимость коэффициента трения  $f$  от нормальной нагрузки  $N$ :**  
*a* – ПСМ "Графитная" с добавкой ультрадисперсного медьсодержащего порошка, полученного электрохимическим методом; *б* – ПСМ "Графитная" с добавкой медного порошка PRS; 1 – "Графитная"; 2 – 1 % порошка; 3 – 2 % порошка; 4 – 5 % порошка; 5 – 10 % порошка; 6 – 20 % порошка

при наличии относительно толстого смазочного слоя порошок не работает, а вступает в действие при наступлении сухого трения.

Снижение коэффициента трения, вероятно, связано с тем, что частицы наполнителя выстилают микронеровности трущихся поверхностей и снижают фактическое давление в контакте, при этом трение локализуется в слое высокопластичного металла – меди. Образовавшаяся пластичная пленка меди уменьшает возможность усталостного разрушения, способствует снижению силы трения и износа сопряженных материалов.

### Вывод

Введение наноразмерных частиц металлоплакирующего компонента значительно улучшает антифрикционные и противоизносные свойства ПСМ, что позволяет увеличить ресурс работы деталей машин и агрегатов за счет замедления изнашивания узлов трения, уменьшить энергозатраты, повысить производительность технологических процессов.

### Библиографический список

1. Грибайло А.П., Агрошенко П.В. Влияние медьсодержащих наполнителей на некоторые трибологические характеристики пластичных смазок // Трение и износ. 1987. Т. 8. № 6. С. 1121–1125.

2. 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.

3. Морарь В.Е., Крачун А.Т., Крачун С.В., Чобану А.С. Исследование смазочных свойств некоторых соединений меди // Трение и износ. 1987. Т. 8. № 2. С. 274–280.

4. Волобуев Н.К., Данилов В.Д., Кузнецов А.А. Влияние ультрадисперсных порошков металлов на свойства смазочных материалов // Трение и износ. 1994. Т. 15. № 5. С. 871–876.

5. Калинин А.А., Мельников В.Г., Юдина Т.Ф., Лазюк Ю.Н. Сравнительная эффективность некоторых наполнителей // Трение и износ. 1988. Т. 9. № 1. С. 173–177.

6. Кужаров А.С., Онищук Н.Ю., Сучков В.В. Влияние медьсодержащих добавок на триботехнические свойства пластичной смазки ЛИТА // Трение и износ. 1989. Т. 10. № 5. С. 903–908.

7. Погодаев Л.И., Кузьмин В.Н., Дудко П.П. Повышение надежности трибосопряжений. Санкт-Петербург.: Академия транспорта Российской Федерации, 2001. 304 с.

8. Тесакова М.В., Парфенюк В.И. Электрокристаллизация ультрадисперсных (наноразмерных) медьсодержащих порошков из водно-изопропанольных растворов сульфата меди // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2008. Т. 51. № 2. С. 54–58.

9. Парфенюк В.И., Тесакова М.В. Электрохимический синтез ультрадисперсных медьсодержащих порошков, полученных из растворов нитратов меди в водно-изопропанольных растворителях // Защита металлов. 2008. Т. 44. № 3. С. 272–276.

10. Томас Г., Гориндж М.Дж. Просвечивающая электронная микроскопия материалов. М.: Наука, 1983. 320 с.

Контактные координаты автора

Парфенюк В.И. – E-mail: vip@isc-ras.ru.



УДК 621.891:621.822

Д.А. Додонова (ООО "Лоран"); В.Ф. Пичугин, д-р техн. наук, Д.В. Лаптев, канд. техн. наук (Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина)

## Исследование антифрикционных и противоизносных свойств алюминийсодержащей смазочной композиции

Представлены результаты исследований процессов трения и изнашивания металлических пар в индустриальном масле I-40A с медьсодержащей присадкой МКФ-18 и алюминийсодержащей смазочной композицией. Выполнены эксперименты по оценке изменений микрогеометрии поверхностных слоев металлических пар на приборах профилографе-профилометре "Цензор", "Тейлеронд". Проведены рентгеноспектральные исследования зоны трения образцов, изношенных в смазочных материалах.

Authors have studied friction and wear processes of metallic couples in the industrial oil I-40A with copper-containing additive MKF-18 and with aluminum-containing lubricant composition. Experiments were performed to assess changes in micro-geometry of the metallic couples' surface layers, using profilograph-profilometer "Cenzor" and "Tailerond". X-ray spectral and layer-by-layer X-ray photoelectron analysis of friction zones were performed for samples, worn in the lubricants.

**Ключевые слова:** трение, изнашивание, смазочные материалы, контактная выносливость, характеристики микрогеометрии, металлсодержащие защитные пленки.

**Key words:** friction, wear, lubricants, contact endurance, parameters of microgeometry, metallcontaining protective films.

Повышение срока службы подвижных сопряжений машин и оборудования достигается различными методами, в том числе улучшениями качества смазочных материалов. Снижение потерь на трение и изнашивание трибосопряжений обеспечивается модифицированием поверхностных слоев деталей машин химическими соединениями за счет введения элементоорганических присадок.

Эффективность соединений, содержащих серу, фосфор, хлор, азот и т.д., связана с формированием на поверхностях трения защитных пленок вторичных структур, которые обеспечивают положительный градиент

механических свойств по глубине. При этом интенсивное адгезионное изнашивание сменяется более умеренным – коррозионно-механическим, но изнашивание все-таки имеет место.

В результате исследований, выполненных в области физико-химических контактных взаимодействий [1], открыто явление безызносности при трении, которое характеризуется образованием на контактирующих поверхностях пары медный сплав–сталь в глицерине медьсодержащей пленки.

Наличие на поверхностях трения защитной пленки особых структуры и свойств, лежащей на упрочненной подложке, обеспечивает локализацию процесса трения в тончайшем поверхностном слое и препятствует вовлечению в процесс деформации более глубоких слоев металла. Коэффициент трения при работе трибосопряжения медный сплав–сталь соответствует режиму жидкостной смазки, а износ практически отсутствует.

В парах алюминиевый сплав–сталь, работающих в некоторых смазочных средах, на поверхностях трения образуется алюминийсодержащая пленка, наличие которой обеспечивает минимальные уровень трения и интенсивность изнашивания элементов подвижных сопряжений [3].

Анализ литературы по использованию новых технологий в триботехнике с целью повышения срока службы трибосопряжений показал, что разработка составов металлсодержащих смазочных материалов, процессов финишной антифрикционной безабразивной обработки, безразборного восстановления технических характеристик машин и оборуду-

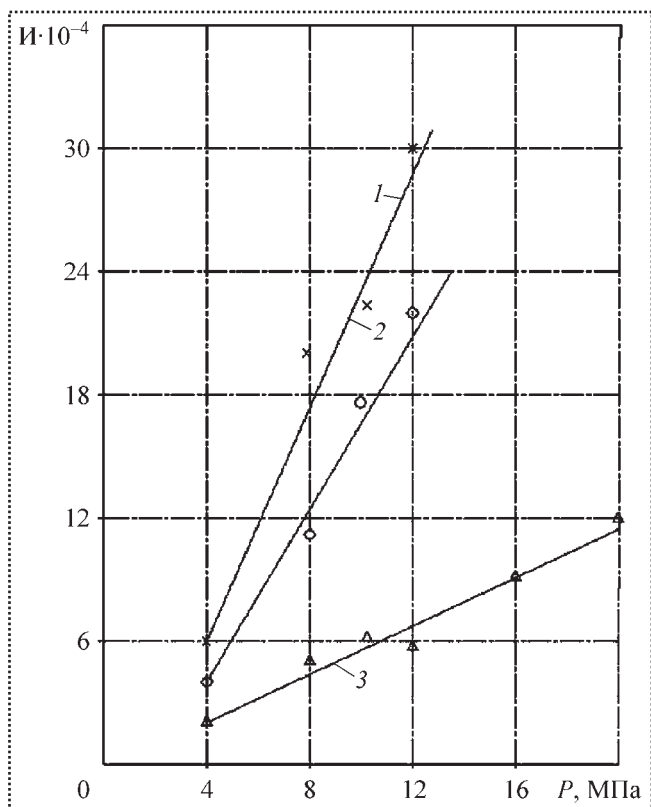


Рис. 1. Влияние смазочных материалов на износ И металлических пар:

1 – масло промышленное И-40А; 2 – масло промышленное И-40А + МКФ-18; 3 – масло промышленное И-40А + алюминийсодержащая композиция – заедание

дования в основном проводятся с применением меди и ее соединений [4, 5], а также олова [6].

Учитывая, что содержание алюминия в природе в количественном отношении значительно превосходит наличие таких элементов, как медь и олово, а также что стоимость алюминия в несколько раз ниже, чем вышеуказанных металлов, была разработана маслорастворимая алюминийсодержащая смазочная композиция и проведено исследование ее триботехнической эффективности.

Эксперименты по влиянию удельной нагрузки на процессы трения и изнашивания металлических пар в смазочных материалах выполняли на модернизированной машине трения СМЦ-2. Образцы – колодки и ролики – изготавливали из стали 40ХН твердостью 52...55 HRC.

Исследование контактной выносливости тел качения проводили на четырехшариковой машине "Плент" (США) при нагрузке на шпиндель машины 4кН и частоте вращения верхнего шара 1000 мин<sup>-1</sup>.

В качестве критерия влияния смазочных материалов на контактную выносливость тел качения – стандартных шаров из стали ШХ-15 диаметром 12,7 мм – принято число циклов нагружений до появления усталостных разрушений на дорожке качения верхнего шара. Время наступления усталостных выкрашиваний фиксировалось на световом табло, а машина трения автоматически отключалась.

В качестве объектов исследования были приняты промышленное масло И-40А и медьсодержащая присадка МКФ-18, которая в соответствии с рекомендациями вводилась в количестве 0,1 масс. % [7], а также алюминийсодержащая композиция, разработанная в РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, оптимальная концентрация которой в смазочном материале составила 2,5 % от объема.

На рис. 1 представлены результаты экспериментальных исследований по влиянию удельной нагрузки И на коэффициент трения  $f$  пары колодка–ролик при скорости скольжения 1 м/с на пути трения 2000 м.

Следует отметить, что увеличение удельной нагрузки при изнашивании металлических пар как в базовом масле И-40А, так и в масле с присадкой МКФ-18, ведет к повышению коэффициента трения. Наличие в промышленном масле присадки МКФ-18 дает снижение коэффициента трения по сравнению с его величиной в базовом масле, а также незначительно повышает критическую нагрузку, увеличение которой приводит к схватыванию и заеданию контактирующих образцов.

Наличие в промышленном масле И-40А алюминийсодержащей композиции в исследованном диапазоне изменения удельных нагрузок на порядок снижает коэффициент трения пары колодка–ролик по сравнению с другими смазочными материалами, а также

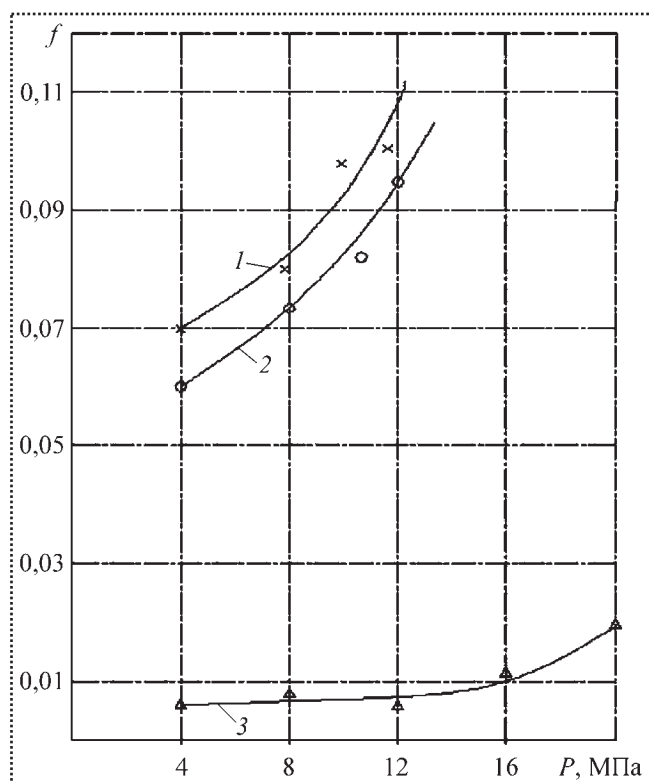


Рис. 2. Изменение коэффициента трения  $f$  пары колodka–ролик в смазочных материалах от удельной нагрузки  $P$  (обозначения те же, что и на рис. 1)

расширяет диапазон удельных нагрузок, при которых узел трения работает в нормальном режиме. Изменение массового износа И пары колodka–ролик, работавших в смазочных материалах, представлено на рис. 2.

Анализ полученных результатов износоустойчивости металлических пар позволяет констатировать, что увеличение удельной нагрузки ведет к повышению массового износа образцов во всех исследованных смазочных материалах. Однако наименьший массовый износ пары отмечается при работе узла трения в индустриальном масле И-40А с алюминийсодержащей композицией, в состав которой входит соединение алюминия, не имеющее предельно допустимой концентрации, а также другие компоненты.

Получены данные о влиянии смазочных материалов на контактную выносливость тел качения (рис. 3). Необходимо отметить некоторое увеличение контактной выносливости

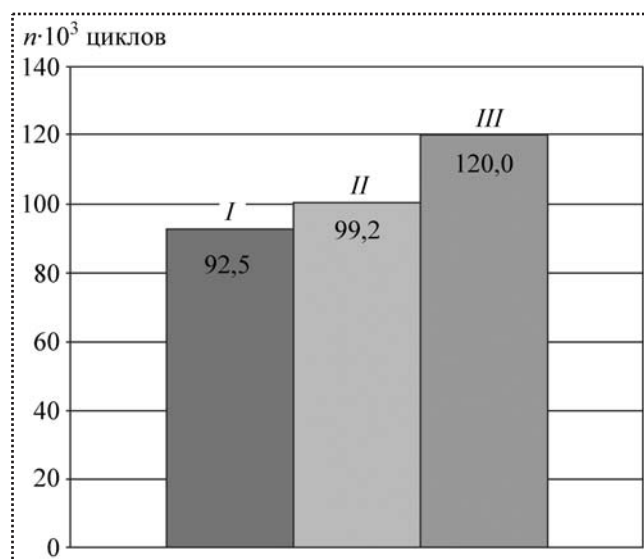


Рис. 3. Влияние смазочных материалов на контактную выносливость тел качения:

*I* – масло индустриальное И-40А; *II* – масло индустриальное И-40А + 0,1 % МКФ-18; *III* – масло индустриальное И-40А + 2,5 % алюминийсодержащей композиции

тел качения при введении в масло И-40А медьсодержащей присадки МКФ-18. Если число циклов нагружений до появления усталостных разрушений на дорожке качения верхнего шара в базовом масле составило  $92,5 \cdot 10^3$  циклов, то в масле с присадкой МКФ-18 –  $99,2 \cdot 10^3$  циклов.

Введение в масло И-40А присадки МКФ-18 в количестве 0,3 масс. %, как показано в работе [8], приводит к снижению контактной выносливости шаров из стали ШХ-15.

Наличие в масле И-40А алюминийсодержащей композиции ведет к повышению контактной выносливости тел качения в 1,3 раза по сравнению с базовым смазочным материалом.

Были проведены исследования по влиянию смазочных материалов на изменение микрогеометрии зоны трения пары колodka–ролик с использованием профилографа–профилометра завода "Калибр", модели 170311 (табл. 1).



### 1. Ёџі áí áí ёá і ёёџі äáí і äöёё çí í ù öðáí ёу і äđú ёí ёí äёá–đí ёёё, ёџí í ø áí í ù ö á ñí äçí ÷í ù ö í äöäёäёäё

Смазочный материал	Параметр $Ra$ шероховатости зоны трения	
	ролик	колодка
До работы	0,58	0,32
Масло индустриальное И-40А	0,55	0,23
Масло индустриальное И-40А + МКФ-18	0,52	0,21
Масло индустриальное И-40А + алюминийсодержащая композиция	0,48	0,16

Из данных, представленных в табл. 1, следует, что после изнашивания металлических пар во всех исследованных смазочных материалах наблюдается снижение величин среднего арифметического отклонения неровностей профиля от средней линии как ролика, так и колодки. Наименьшее значение  $Ra$  имеют при изнашивании образцов в масле И-40А с алюминийсодержащей композицией. Можно предположить, что при изнашивании пары колодка–ролик в масле с исследуемой композицией повышение качества поверхностного слоя образцов достигается за счет трибомодификации зоны трения путем формирования алюминийсодержащей защитной пленки.

Аналогичные результаты по повышению качества поверхностного слоя зоны трения тел качения получены при оценке изменений микрогеометрии этих тел с использованием приборов "Тейлеронд" и "Цензор" (Англия). В табл. 2 приведены данные по

влиянию смазочных материалов на изменение микрогеометрии тел качения.

Проведенные эксперименты свидетельствуют о том, что введение в индустриальное масло И-40А медьсодержащей присадки МКФ-18 способствует снижению величин волнистости и гранности в зоне трения шаров из стали ШХ-15 по сравнению с аналогичными характеристиками поверхностного слоя тел качения, изношенных в базовом смазочном материале. Наименьшие значения волнистости, гранности и шероховатости зоны трения тел качения отмечаются при работе четырехшариковой машины трения в масле И-40А с алюминийсодержащей смазочной композицией.

Для оценки содержания некоторых элементов в зоне трения образцов, изношенных в масле И-40А с присадкой МКФ-18 и алюминийсодержащей композицией, выполнены рентгеноспектральные исследования на ска-

### 2. Ёџі áí áí ёá öäðäёäöäёñöёё і ёёџі äáí і äöёёё í í ääđóí í ñöí í ä ñёí у öäё ёá÷áí ёу, ёџí í ø áí í ù ö á ñí äçí ÷í ù ö í äöäёäёäё

Смазочный материал	Характеристики микрогеометрии, мкм		
	волнистость $H_v$	гранность $\Delta$	шероховатость $Ra$
До работы	0,06	0,5	0,14
Масло индустриальное И-40А	2,8	7,5	0,22
Масло индустриальное И-40А + МКФ-18	1,2	1,6	0,22
Масло индустриальное И-40А + алюминийсодержащая композиция	0,4	1,0	0,16



### 3. Nĩ aãðæáí èà í àèí òí ðú ò yéàí áí òí à à çí í à òðáí èy í áðàçòí à-èí èí áí è, èçí í ò áí í ù ò à ï àðá ñí òæèüí ùí ðí èèèí , à ñí àçí ÷í ù ò ï àðáðèàèò

Смазочный материал	Содержание элементов, масс. %			
	Fe	Cr	Al	Cu
Масло И-40А + МКФ-18	98,87	1,10	—	0,03
	98,61	1,37		0,02
	98,79	1,19		0,02
	Средние значения			
	98,75	1,22	—	0,02
Масло И-40А + алюминийсодержащая композиция	98,66	1,15	0,19	—
	98,97	0,94	0,10	
	98,39	1,40	0,22	
	Средние значения			
	98,67	1,16	0,17	-

нирующем микроскопе Carl Zeiss Leo-430i с рентгеноспектральным микроанализатором "Oxford Instruments" и энергодисперсионным детектором.

В табл. 3 приведены данные о содержании некоторых элементов в зоне трения образцов колодок, а в табл. 4 – на дорожке шаров из стали ШХ-15.

Рентгеноспектральные исследования зоны трения металлических пар, изношенных в масле И-40А с медьсодержащей присадкой

МКФ-18, показали, что в поверхностном слое образцов, работавших как в режиме трения скольжения, так и трения качения, наблюдается незначительное количество меди. Можно предположить, что имеющиеся в составе присадки МКФ-18 соль меди и олеиновая кислота не обеспечивают формирование защитной медьсодержащей пленки, обеспечивающей низкие триботехнические характеристики. Наличие в составе присадки МКФ-18 соединений меди и кислоты установлено авторами статьи методом ИК-спектроскопии.

### 4. Nĩ aãðæáí èà í àèí òí ðú ò yéàí áí òí à à çí í à òðáí èy ò àðí à, ðàáí òàáø èò à ñí àçí ÷í ù ò ï àðáðèàèò

Смазочный материал	Содержание элементов, масс. %				
	Fe	Cr	Ni	Al	Cu
Масло И-40А + МКФ-18	98,61	1,35	—	—	0,04
	98,74	1,22	0,02		0,02
	98,32	1,64	—		0,04
	Средние значения				
	98,55	1,30	0,007	—	0,03
Масло И-40 + алюминийсодержащая композиция	98,44	1,45	—	0,11	—
	97,88	2,10	—	0,11	
	98,58	1,23	0,03	0,16	
	Средние значения				
	98,28	1,59	0,01	0,13	—

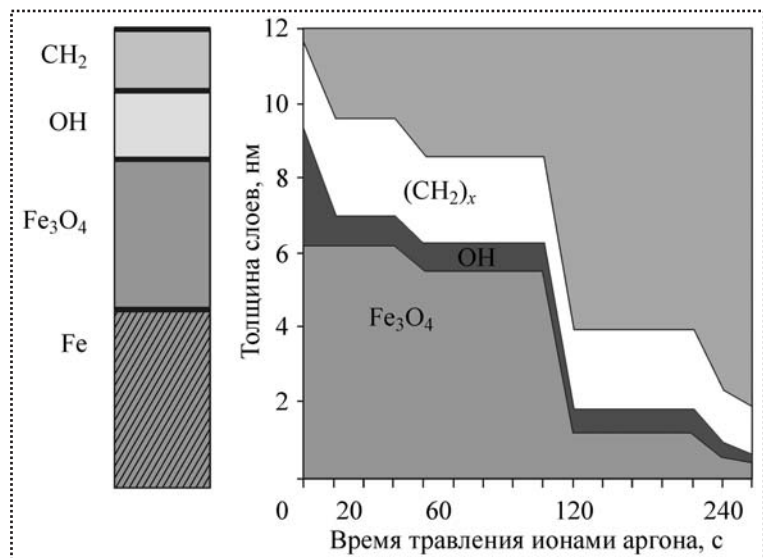


Рис. 4. Состав, строение и толщина защитной пленки в зоне трения металлических пар, изношенных в масле И-40А

В поверхностном слое подвижных сопряжений, работавших в минеральном масле с алюминийсодержащей смазочной композицией, методом рентгеноспектрального анализа установлено, что в зоне трения металлических пар образуется алюминийсодержащая пленка. Содержание алюминия в составе защитной пленки значительно больше, чем меди в зоне трения образцов, изношенных в масле И-40А с присадкой МКФ-18.

По всей вероятности, содержание металла в поверхностном слое трибосопряжений не является определяющим фактором в процессе формирования защитных пленок, обеспечивающих триботехнические характеристики узлов трения, а преобладающее значение имеют органические соединения, входящие в состав металлосодержащих композиций.

Полученные экспериментальные данные по влиянию смазочных материалов на процессы трения и изнашивания пары колodka–ролик, а также на контактную выносливость тел качения показали, что по антифрикционным и противоизносным свойствам базовое масло И-40А и то же масло с присадкой МКФ-18 мало различаются между собой. В связи с этим были выполнены послойные

рентгенофотоэлектронные исследования состава, строения и толщины защитных пленок на поверхностях трения образцов, изношенных в масле И-40А и в масле И-40А с алюминийсодержащей смазочной композицией.

На рис. 4 представлена схема строения защитной пленки, которая сформировалась на поверхностях трения металлических пар, изношенных в минеральном масле И-40А. Самый поверхностный слой толщиной порядка 3 нм представлен метиленовыми группами  $\text{CH}_2$ , ниже которых имеются гидроксильные группы  $\text{OH}$ . Железо в поверхностном слое находится в соединении с кислородом, а ниже — в металлическом состоянии. Толщина сформированной пленки — порядка 12 нм.

Состав, строение и толщина защитной пленки на металлических поверхностях после работы в масле И-40А с алюминийсодержащей композицией представлена на рис. 5. Следует отметить, что поверхностный слой защитной пленки до травления ионами аргона представлен углеродом и кислородом, а с увеличением толщины удаляемого слоя их содержание в зоне трения снижается.

В поверхностном слое железо присутствует как в окисленном  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , так и в металлическом состоянии. Алюминий располагается по всей толщине защитной пленки и находится в соединении с кислородом, так как энергетический спектр электронов алюминия (рис. 5, а) зоны трения стального образца характеризуется энергетическим пиком, равным 74,6 эВ, тогда как в металлическом состоянии энергетический пик алюминия соответствует 72,3 эВ. Выполненные послойные рентгенофотоэлектронные исследования зоны трения стального образца (рис. 5, б), работавшего в масле И-40А с алюминийсодержащей композицией, позволяют констатировать, что в поверхностном



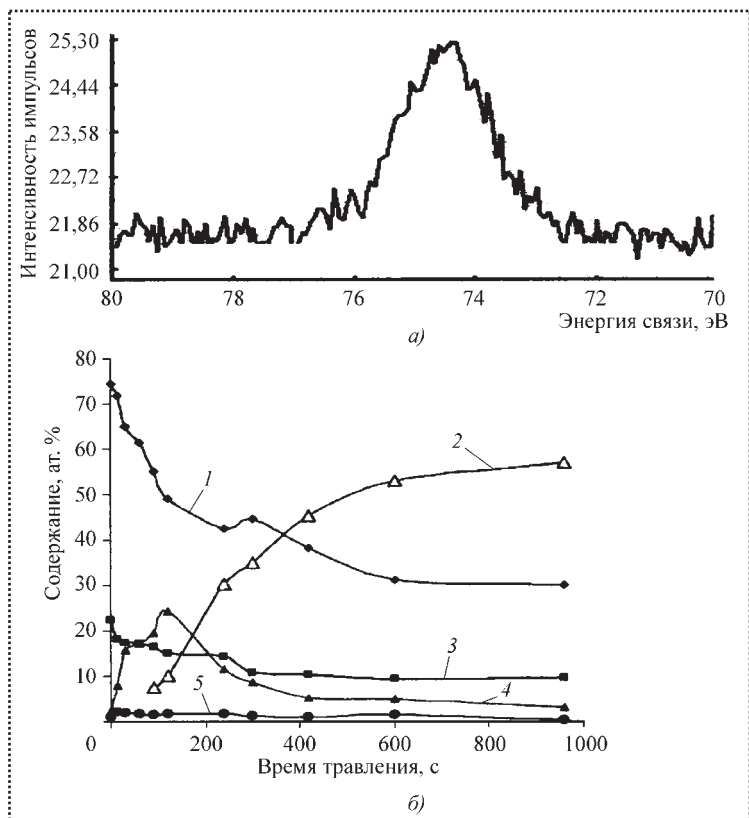


Рис. 5. Исследование состава и строения алюминийсодержащей пленки на стальном образце:

*a* – энергетический спектр электронов Al зоны трения стального образца; *b* – послынные рентгенофотоэлектронные исследования зоны трения стального образца; 1 – C; 2 – Fe (т); 3 – O; 4 – Fe (ox); 5 – Al

слое формируется алюминийсодержащая пленка толщиной порядка 500 нм.

### Вывод

Наличие на контактирующих поверхностях мягкой пленки, в состав которой входит алюминий особой структуры и свойств, лежащий на упрочен-

ной подложке, обеспечивает локализацию процесса трения в тончайшем поверхностном слое и препятствует вовлечению в процесс деформации более глубоких слоев металла. При этом низкий коэффициент трения и высокая износостойкость подвижных сопряжений как при скольжении, так и качении, связаны в основном с наличием в смазочном материале алюминийсодержащей композиции, которая в процессе взаимодействия триады трения обеспечивает формирование антифрикционной и противоизносной пленки.

### Библиографический список

1. Гаркунов Д.Н. Триботехника. Износ и безызносность. М.: МСХА, 2001. 616 с.
2. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. М.: Машиностроение, 1982, 212 с.
3. Пичугин В.Ф., Пичугин Д.В. Избирательный перенос алюминия при изнашивании пары алюминий-сталь в смазочных средах. Вестник машиностроителя. 2002. № 10. С. 28–32.
4. Гаркунов Д.Н., Бабель В.Г., Мамыкин С.М. и др. Новые направления в триботехнике и их использование в повышении износостойкости машин и механизмов. М.: МСХА, 2007. 58 с.
5. Балабанов В.И., Беклемишев В.И., Гамидов А.Г. и др. Безразборный сервис автомобилей. М.: Известия, 2007. 272 с.
6. Радин Ю.А., Сулов П.Г. Безызносность деталей машин при трении. М.: Машиностроение, 1988, 229 с.
7. Гаркунов Д.Н. Научные открытия в триботехнике. Эффект безызносности при трении. Водородное изнашивание металлов. М.: МСХА, 2004. 384 с.
8. Курапов П.А. Усталостное разрушение поверхности деталей пар качения в условиях воздействия активной смазочной среды. Трение и износ, 2008. Т. 29. № 4. С. 387–390.

### Контактные координаты авторов

Додонова Дарья Андреевна – инженер ООО "Лоран"; тел.: 8 499 4374096.

Пичугин Владимир Федорович – профессор, зав. кафедрой "Износостойкость машин и оборудования и технологии конструкционных материалов"; e-mail: Pichugin.RGU@gmail.com.

Лаптев Дмитрий Васильевич – доцент кафедры "Износостойкость машин и оборудования и технологии конструкционных материалов"; тел.: 8 499 2339244.

# РАСЧЕТ, КОНСТРУИРОВАНИЕ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

УДК 629.113.004.57

**А.А. Макушин**, канд. техн. наук, **А.Т. Кулаков**, д-р техн. наук (Камская государственная инженерно-экономическая академия, г. Набережные Челны), **А.С. Денисов**, д-р техн. наук (Саратовский государственный технический университет)

## Анализ потерь давления масла в каналах коленчатого вала двигателя

*Изложены результаты расчетных исследований функционирования системы смазывания подшипников коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания, дан анализ причин, определяющих потери давления масла в каналах коленчатого вала. Аналитические исследования подтверждены экспериментально.*

*Results of settlement probes of internal combustion engine crankshaft bearing lubrication system functioning stated, the analysis of the reasons and the factors defining pressure losses in crankshaft oil duct is given. Analytical probes are confirmed experimentally.*

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, трение, интенсивность изнашивания, повышение долговечности, коленчатый вал, вкладыш подшипника, система смазывания, масляные каналы, детали узлов трения.

**Key words:** internal combustion engine, a friction, wear rate, equipment durability, crankshaft, bearing shell, lubrication system, oil duct, friction units details.

**В** практике отечественного и зарубежного двигателестроения повышение мощности достигается за счет форсирования режимов надежно работающих двигателей. Тенденции создания двигателей внутреннего сгорания (ДВС), форсированных по среднему эффективному давлению и частоте вращения коленчатого вала, приводят к росту тепловых и механических нагрузок на основные детали узлов трения двигателей, что, в свою очередь, требует поиска путей повышения износостойкости трибосопряжений ДВС, их надежности и долговечности.

Отказы и неисправности ДВС становятся причиной простоя транспортных средств и мобиль-

ных агрегатов. Ремонт ДВС сложен, связан с большими затратами труда, материалов и запасных частей [1]. Для снижения остроты проблемы заводы-изготовители создают фирменные системы обслуживания и ремонта. Так, например, фирменная система технического обслуживания и ремонта КАМАЗ, созданная в 1977 г., уже через пять лет имела в своем составе четыре завода по ремонту двигателей и около двухсот автоцентров технического сервиса [2].

Функционирование ремонтных заводов и автоцентров фирменной системы обслуживания и ремонта позволяет проводить определенный объем экспериментальных исследований по изучению условий работы деталей и механизмов, их прочности, стойкости к изнашиванию и деформированию. Исследование условий работы, износостойкости и надежности деталей двигателей считается одной из важнейших конструкторских, технологических и эксплуатационных задач.

К числу наиболее ответственных сборочных единиц относят кривошипно-шатунный механизм (КШМ) двигателя, в первую очередь, сопряжение «кривошипная шейка коленчатого вала – вкладыш – кривошипная головка шатуна» [3]. Зная закономерности изменения условий смазывания, изнашивания и состояния деталей подшипников КШМ, можно осуществлять конструкторские, технологические и эксплуатационные мероприятия по повышению надежности и долговечности как этого сопряжения, так и двигателя в целом при более равномерном и полном использовании его ресурса [4].

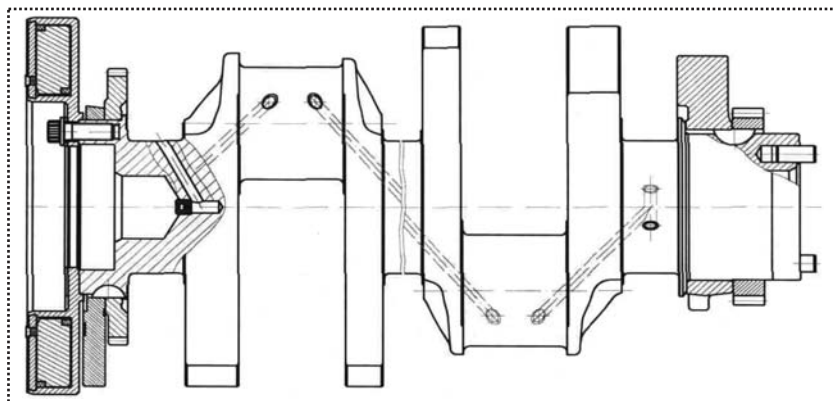


Рис. 1. Коленчатый вал двигателя и схема маслоканалов

Исследование выполнено на примере распространенной схемы подвода масла к подшипникам коленчатого вала, которая применяется в дизельных двигателях (рис. 1). Масло по каналам в блоке цилиндров подводится в кольцевую канавку 1, выполненную в верхнем вкладыше коренного подшипника (рис. 2). Из нее по одному или диаметрально противоположным каналам 2 масло попадает в каналы 3 коленчатого вала. Пройдя по каналам 4, масло поступает в центробежную ловушку 5, из которой через два отверстия, просверленные противоположно друг другу в плоскости, перпендикулярной кривошипу (позднее через одно отверстие), масло поступает в подшипники шатунов одного и другого цилиндров (см. рис. 2).

Многие из допущений, используемых при создании моделей функционирования системы смазки подшипников, конечно, являются не в полной мере реалистичными, но целесообразными. Эти допущения включают, например, предположения об идеально круглых, малодеформирующихся под нагрузкой подшипниках и «идеальную» подачу из вязкого (т.е. рассматриваемого как ньютоновская жидкость) масла. Во многих случаях предполагается, что рабочая поверхность подшипника не прерывается устройствами подачи масла в зоне давления созданной пленки, внешней по отношению к подшипнику.

С ростом возможностей ЭВМ была признана необходимость:

- пересмотра допусков на изготовление деталей;
- учета формы подшипника и вкладышей и их упругих свойств;
- совершенствования устройств подачи масла;
- исследования процесса образования масляной пленки.

Задачей данной работы является детальное исследование процесса смазки подшипников.

Отечественные и зарубежные ученые используют несколько моделей смазки подшипников коленчатого вала, комплексно отражающих различные стороны работы этого узла. В работе [3] описаны результаты экспериментальных исследований изменения условий смазки шатунных подшипников в процессе работы дизеля. Постулируется, что расход масла через шатунные подшипники определяется давлением его в кольцевом канале коренного подшипника, от которого они питаются, режимом работы и техническим состоянием двигателя.

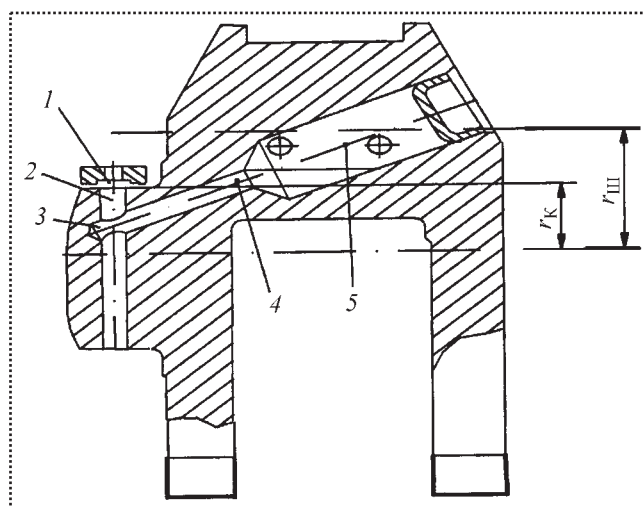


Рис. 2. Схема смазки шатунного подшипника двигателя КамАЗ:

1 – кольцевой канал; 2 – канал в коренной шейке; 3 – вход в канал подвода к шатунной шейке; 4 – канал подвода; 5 – полость;  $r_{\text{ш}}$  – радиус шейки;  $r_{\text{к}}$  – радиус кольцевого канала



В процессе исследования выявлена неравномерность величины давления масла по кольцевым каналам коренных опор. Установлено, что из коренных опор, в которых давление масла имеет наименьшие значения, питаются шатунные подшипники; в них с наибольшей частотой происходит проворачивание вкладышей.

Таким образом, можно сделать вывод о четкой связи между неравномерностью давления масла по коренным опорам и неравномерностью частоты проворачивания шатунных вкладышей смазываемых опор.

Исследованиями условий подачи масла к шатунному подшипнику по каналам вращающегося коленчатого вала установлено, что у двигателя, работающего при частотах вращения не более  $5000 \text{ мин}^{-1}$ , могут возникнуть проблемы стабилизации потока масла, проходящего через передаточные отверстия, при работе на более высоких скоростях. Считается, что главными причинами возникающих проблем являются потери давления, имеющие место при увеличении скорости движения масла до скорости вращения поверхности шейки вала и центробежной силы, действующей на масло в перепускных отверстиях. Действия этих условий возрастают пропорционально квадрату скорости коленвала и быстро становятся значимыми при частоте вращения  $5000 \text{ мин}^{-1}$ .

При создании модели движения масла по каналам коленчатого вала необходимо учитывать, что *масляный поток прежде всего зависит от следующих факторов:*

- совпадения траектории шейки коленчатого вала и потока масла в подшипнике;
- центробежных потерь;
- потерь, связанных с ускорением масла до скорости вращения поверхности шейки;
- потерь на внутреннее трение;

- потерь ускорения потока масла в перепускном канале вследствие импульсного характера потока.

### Совпадение траектории движения кривошипа и потока масла в коренном подшипнике

Совпадение траекторий движения коленчатого вала и потока масла в коренном подшипнике означает, что между ними существует достаточное проходное отверстие. Например, подшипник с масляной канавкой в виде полной окружности имеет сплошное совпадение. Из-за вредного воздействия канавок на несущую способность вкладыша в большинстве конструкций вкладышей обычно ограничиваются частичными канавками, которые занимают половину окружности подшипника (угол  $180^\circ$ ). В двигателях вследствие этого перепускные отверстия коленчатого вала имеют место с обоими периодами: как совпадение (рис. 3, а) траекторий движения шейки коленвала и потока масла, так и несовпадение (рис. 3, б).

При несовпадении (см. рис. 3, б), когда канал не шире диаметрального зазора подшипника, входной поток будет незначительным. Действительно, поскольку низкое давление

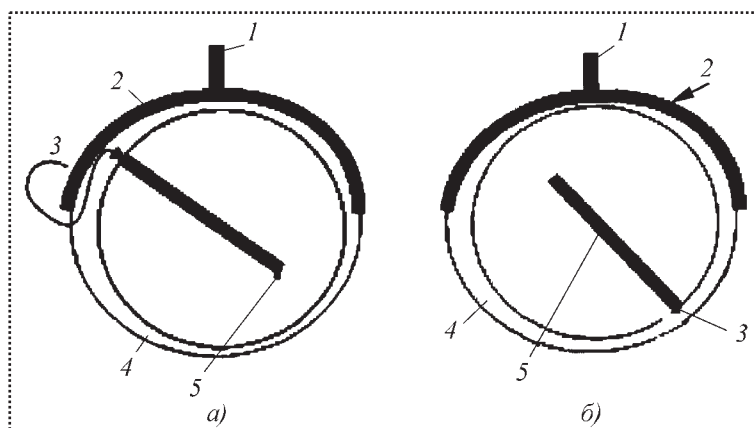


Рис. 3. Схема подвода масла к коренной шейке коленчатого вала: а – положение коренной шейки коленчатого вала, при котором вход 3 в перепускной канал 5 совпадает с заполненной маслом канавкой 2; б – положение коренной шейки коленчатого вала, при котором вход 3 в перепускной канал 5 не совпадает с канавкой 2; 1 – подача масла; 2 – канавка подшипника; 3 – (вход) выход масла; 4 – зазор; 5 – перепускной канал



возникает одновременно с относительно большими зазорами, вполне вероятно, что во время несовпадения масло скорее будет вытекать из перепускного отверстия коленчатого вала в зазор коренного подшипника, чем втекать в него. Таким образом, совпадение является обязательным условием для поступления обильного потока масла в перепускной канал.

### Потери за счет центробежных сил

Отверстие перепускного канала между коренной и шатунной шейками состоит из прямых отрезков. Функционально эти части канала играют принципиально различные роли. Радиально расположенный в коленчатом валу участок от поверхности коренной шейки до точки ближайшего подхода к центральной части коленчатого вала можно рассматривать как входную часть. Центробежная сила, действующая на этом участке, препятствует потоку масла, входящему в вал. Остальная часть перепускного канала функционирует как масляный резервуар и как центробежный насос для подачи масла к шатунным подшипникам.

Чтобы «втолкнуть» масло в резервуарную часть во время вращения коленчатого вала, необходимо преодолеть центробежные силы, действующие на масло во входной части. Для осуществления этого необходимо приращение давления

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho \omega^2 (r^2 - s^2), \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность масла;

$\omega$  — угловая скорость;

$r$  — радиус шейки коренного подшипника коленчатого вала;

$s$  — расстояние от точки пересечения входного канала и перепускного канала прохождения масла до оси вращения коленчатого вала.

При движении масла через входной и перепускной каналы на него будет оказывать воз-

действие также сила Кориолиса. Однако поскольку эта сила действует перпендикулярно направлению движения во вращающейся системе координат, то она будет просто прижимать масло к стенке перепускного отверстия. Её действие будет аналогично действию силы тяжести на масло в горизонтальной трубке. В сущности сила Кориолиса имеет незначительное влияние на поток масла.

### Потери на ускорение масла до скорости вращения поверхности шейки

В отличие от масла в канавке подшипника, которое имеет нулевую кинетическую энергию, масло во входном канале вращающейся коренной шейки возле входа имеет кинетическую энергию на единицу объема, определяемую формулой

$$T_m = \frac{1}{2} \rho (\omega r)^2. \quad (2)$$

Для распространенной конструкции шейки с простым перепускным отверстием существуют два способа увеличения энергии до необходимого значения за счет повышения:

- ◆ давления маслоподачи;
- ◆ поперечной силы вязкости, действующей на поверхности шейки.

Использование одного из этих способов зависит от потока масла за оборот вала в сравнении с маслом, содержащимся в канавке подшипника:

- если пленка минимальна или отсутствует, тонкий слой масла, следующий за шейкой, ускоренный почти до скорости вращения поверхности силами внутреннего трения, будет достаточен для минимального поддержания работоспособности трибосопряжения;

- если значительная часть объема масла в канавке перемещается при каждом обороте, маслоподача должна создать некоторую энергию, необходимую для ускорения масла до скорости поверхности шейки.

Вследствие высокой скорости потока и незначительной вязкости всю необходимую



энергию должна обеспечить маслоподача. Следовательно, потребное приращение давления маслоподачи (или фактическое снижение давления) будет численно равно

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho (\omega r)^2. \quad (3)$$

Для решения этой проблемы были испробованы *различные модификации стандартной геометрии потока*:

- «полуэллиптический желоб» для облегчения прохождения потока в перепускной канавке;
- специальные углубления для подвода масла;
- шейки коленчатого вала с подводными канавками.

Наиболее интересным является последнее предложение. Оно улучшает ситуацию по следующим двум причинам:

- суммируется кинетическая энергия масла в подводной канавке шейки и масла в канавке подшипника, что служит эффективным средством ускорения масла до скорости поверхности вращения шейки. Это снижает требование к давлению подачи, когда при более высоких скоростях коленчатого вала только одна поперечная сила вязкости не может ускорить значительное количество объема масла, чтобы удовлетворить требованиям работоспособности шатунного подшипника. Уменьшение потребности в давлении (или, равнозначно, в доле эффективного давления) будет равно

$$\Delta P' = f_1 \frac{1}{2} \rho (\tilde{\omega} r)^2, \quad (4)$$

где  $0 \leq f_1 \leq 1$  и зависит от рабочих параметров подшипника;

- сила реакции на шейке вследствие смешивания масла в канавке подшипника с маслом в канавке шейки сосредоточивается, главным образом, на задней поверхности подводной канавки (см. рис. 3). Результатом

этого является увеличение давления на входе в перепускное отверстие, что увеличивает поток масла. Доля эффективного давления будет

$$\Delta P'' = f_2 \frac{1}{2} \rho (\tilde{\omega} r)^2, \quad (5)$$

где  $0 \leq f_2 \leq 1$  вновь зависит от рабочих параметров подшипника.

Таким образом, в дополнение к ускорению потока масла подводная канавка за счет силы реакции потока может увеличить давление в области, наиболее благоприятной для продвижения потока масла. Следует помнить, что *подобно канавке в подшипнике, канавка шейки уменьшает несущую способность подшипника*. Поэтому ее размещение должно быть тщательно продумано.

#### Потери на внутреннее трение

Поток вязкого масла через небольшое отверстие входного и перепускного каналов встречает достаточное сопротивление, и вследствие этого имеет место падение давления. В расчетах необходимо учитывать, что оказывает влияние факт пересечения границы канавки подшипника и канавки шейки (см. рис. 3, жирная черта) потоком масла подшипника и шейки. Поэтому допускается, что потери на внутреннее трение выражаются уравнением

$$\Delta P''' = f_3 \frac{1}{2} \rho (\tilde{\omega} r)^2, \quad (6)$$

где  $f_3$  – безразмерный коэффициент потерь, зависящий от геометрии канавки.

#### Потери на ускорение

Если геометрия подшипника и канавки такова, что там существует какой-то период несовпадения, тогда будет наблюдаться потеря давления, связанная с ускорением масла, находящегося в перепускном отверстии каждый раз, когда поток восстанавливается.



Описанные исследования дают возможность подойти к решению поставленной задачи совершенствования процесса смазки шатунных подшипников и двигателя внутреннего сгорания. Рассмотрим существовавший до недавнего времени процесс смазки этих подшипников.

В дизельном двигателе смазка шатунных подшипников производится через просверленные в щеках коленчатого вала каналы, идущие от коренных шеек.

Каналы состоят из трех прямолинейных участков:

○ первый – сквозной по диаметру коренного подшипника для всех коренных подшипников кроме первого;

○ второй – наклонный от оси вращения коленчатого вала до оси шатунной шейки;

○ два третьих – сквозные по диаметру шатунной шейки, перпендикулярные плоскости, образованной первыми двумя каналами.

Стыковка второго, наклонного канала с двумя третьими каналами, которые расположены параллельно, происходит через полость, расположенную в шатунной шейке и служащей одновременно грязеуловителем.

Наличие такой системы каналов характерно для V-образных двигателей и обусловлено присоединением к каждой шатунной шейке пары шатунов по одному из двух рядов цилиндров двигателя. Оптимальной считается работа шатунного подшипника при наличии необходимой масляной пленки между трущимися поверхностями.

Рассмотрим *физический процесс движения масла*. Поступление масла в первый канал от верхнего вкладыша коренного подшипника, имеющего специальную канавку для подвода масла, происходит с прерыванием потока ввиду течения его в различных положениях коленчатого вала с разных сторон. Это импульсный перепад давлений и расход масла в первом и втором каналах компенсируются запасом его в полости шейки между вторым и третьим каналами, где давление увеличивает-

ся за счет центробежной силы на радиусе, равном расстоянию между осями коленчатого вала и шатунной шейки. Снижение скорости движения масла происходит за счет трения о стенки каналов и изменения проходного сечения от канала к каналу.

Проанализируем *потребление масла от коренных опор подшипников коленчатого вала*:

• кроме смазки подшипников коренных опор, масло, подводимое к опоре, расходуется на смазку соответствующего подшипника распределительного вала;

• во всех опорах, кроме третьей, масло отбирается для смазывания шатунных подшипников;

• дополнительно от первой опоры смазывается топливный насос высокого давления и гидромуфта;

• от второй, третьей и четвертой опор масла расходуется на смазку осей коромысел механизма газораспределения, а четвертая опора служит также источником смазки компрессора.

Следовательно, расход масла при таком разнообразии потребителей будет различным для каждой опоры и существенно зависимым от множества факторов, главными из которых можно считать: число, размеры и конфигурация отбирающих масло каналов; динамические нагрузки, действующие на перемещаемое по этим каналам масло; свойства масла.

Оценим относительное распределение подводимого к коренному подшипнику количества масла по различным потребителям. Исследованиями установлено, если общее количество масла, проходящего от магистрали к подшипнику коленчатого вала, принять равным единице, то *потребление отдельных питаемых элементов системы смазывания будет следующим*:

• коренной подшипник – 0,5;  
• подшипник распределительного вала – 0,2;  
• шатунный подшипник коленчатого вала – 0,2;



- коромысла газораспределительного механизма – 0,05;
- топливный насос высокого давления – 0,05;
- гидромурфта – 0,05;
- компрессор – 0,05.

Принятое распределение масляного потока идеально для первой коренной опоры коленчатого вала и не приемлемо для всех остальных. Это означает, что при одинаковом диаметре трубопровода системы смазки и одинаковом давлении в этой системе одни опоры будут испытывать дефицит масла, а другие работать в комфортных условиях. Следовательно, *требуемое количество масла для различных коренных опор по отношению к первой будет следующим:*

- вторая – 1,05;
- третья – 0,8;
- четвертая – 1,1;
- пятая – 0,9.

Относительный избыток масла ощущают третья и пятая коренные опоры, а первая и особенно четвертая испытывают недостаток

масла. Аналитические исследования потерь давления масла в каналах коленчатого вала подтверждены экспериментально.

#### Вывод

Расчеты системы смазки подшипников коленчатого вала двигателя требуют совершенствования с учетом выявленных закономерностей.

#### Библиографический список

1. Авдонькин Ф.И., Денисов А.С., Макушин А.А. Надежность и эффективность автомобилей КамАЗ // Автомобильная промышленность. 1986. № 5. С. 21–22.
2. Макушин А.А. Фирменная система обслуживания и ремонта автомобилей КамАЗ // Автомобильная промышленность. 1986. № 8. С. 24–26.
3. Макушин А.А., Кулаков А.Т., Кулаков О.А. Экспериментальное исследование условий смазки шатунных подшипников в процессе эксплуатации // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2008. № 4. С. 17–20.
4. Макушин А.А., Кулаков А.Т., Кулаков О.А. Особенности ремонта коленчатых валов дизелей КамАЗ // Ремонт, восстановление, модернизация. 2008. № 2. С. 16–18.

#### Контактные координаты автора

Макушин Александр Александрович – e-mail: alma9494@mail.ru,  
тел.: 8 (927) 671-66-69.





УДК 629.4.077-597.3

Л.А. Вуколов, д-р техн. наук (Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта)

## Тормозные колодки повышенной работоспособности

В настоящее время в связи с увеличением нагрузок и скоростей эксплуатации грузовых вагонов остро стоит вопрос о эффективности тормозных колодок. Ученые и эксплуатационники пришли к выводу, что колесосберегающие композиционные тормозные колодки, биметаллические и металлокерамические колодки оказались наиболее приемлемыми по результатам их работы. Эти тормозные колодки, особенно композиционные с чугунными вставками, увеличивают срок службы колесных пар и в то же время гарантируют зачистку небольших дефектов, таких как ползуны, выщербины, обеспечивают безопасность движения поездов с увеличенными скоростями с соблюдением необходимой тормозной эффективности

*Railways and freight car owners continue to push suppliers for better and more cost-effective brake shoes. Research workers and Railway administrations have found that composite tread guard, binary and sintered iron brake shoes are becoming more popular better data coming in on the results of their use. These shoes especially composite tread guard with cast iron inserts prolong the service life of wheels and at the same time ensure any defects which develop, such as skid flats, spillings are automatically removed, assisting in increasing train velocity through the system at high level of safety providing necessity of braking capacity.*

**Ключевые слова:** тормозная колодка, чугунная вставка, колесосберегающая, биметаллическая, металлокерамическая, колесная пара, дефекты, поверхность катания колеса.

**Key words:** brake shoe, cast iron insert, tread guard wheel, binary, sintered metal, wheel set, defects, wheel tread.

Весь парк грузовых вагонов, эксплуатируемых в России и странах СНГ, оснащен композиционными тормозными колодками. Срок службы композиционных колодок в три–четыре раза превышает срок службы чугунных, они значительно дешевле и эффективнее их. Однако композиционные тормозные колодки из-за низкого коэффициента теплопроводности имеют недостаточный ко-

эффициент трения в холодный период времени: температурах от нуля до минус 10 °С, при обледенениях, что вызывает необходимость разработки улучшенного фрикционного материала и конструкции тормозных колодок [1].

При взаимодействии колес с рельсами имеет место дефектообразование на поверхностях катания колес, в связи с чем для увеличения ресурса этих колес необходима разработка колесосберегающих тормозных колодок [2, 3].

Перед учеными и производителями тормозных колодок поставлена задача совершенствования физико-механических свойств тормозных колодок по основным направлениям:

- срок эксплуатации колодок должен, как минимум, быть приравнен к межремонтному пробегу вагона;
- колодки должны поддерживать сохранность колес;
- необходимо обеспечить тормозное нажатие, позволяющее водить поезда повышенных веса и длины с увеличенной скоростью, в том числе и для вагонов с увеличенной осевой нагрузкой [4].

В настоящее время программы производятся три перспективные группы тормозных колодок:

- биметаллические колодки (чугунные колодки со стальными вставками в виде цилиндрических штырей (рис. 1...3);
- композиционные колодки со специальными вкладышами, в том числе с чугунными вставками, обеспечивающими сохранность колес (рис. 4);
- металлокерамические колодки (рис. 5).

В течение двух лет биметаллические колодки, изготовленные ОАО “Завод Универсал” в

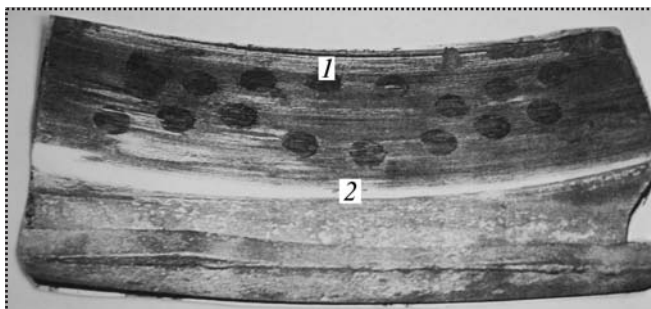


Рис. 1. Биметаллическая локомотивная гребневая чугунная тормозная колодка со стальными вставками:  
1 – стальные цилиндрические вставки; 2 – серый чугун

г. Новокузнецке, прошли комплекс заводских, лабораторных и стендовых испытаний во ВНИИЖТ. Начиная с января 2007 г. данные колодки проходят эксплуатационные испытания в замкнутом маршруте на грузовых вагонах и локомотивах Кузбасского отделения Западно-Сибирской железной дороги. За период испытаний получены хорошие результаты по увеличению износостойкости колодок, но в то же самое время определился и их недостаток – повышенный прокат у колес.

С 2001 г. ОАО «Фритекс» совместно с ВНИИЖТ ведут работы по созданию композиционной колодки с чугунной вставкой.

В 2007 г. на Северной ж.д. закончены эксплуатационные испытания четырех типов композиционных колодок производства ОАО «Фритекс»: из материала «Фритекс-970/2» (безасбестовый композиционный материал с металлической шерстью) без чугунной вставки, три вида колодок с чугунной вставкой из различных материалов.



Рис. 2. Стальной каркас биметаллической тормозной колодки

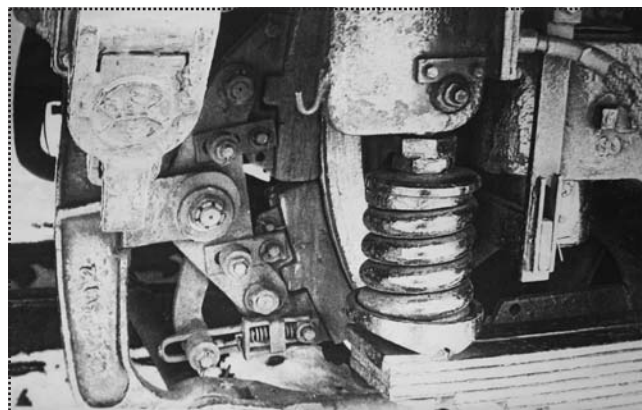


Рис. 3. Секционные безгребневые биметаллические тормозные колодки на пассажирском электровозе серии ЧС-2Т

На Экспериментальном кольце ОАО «ВНИИЖТ» успешно прошли стендовые и в настоящее время идут ходовые испытания новых колодок производства ОАО «ВАТИ» – комбинированных из безасбестового материала ТИИР-302 со вставкой из композиционного материала с металлическими наполнителями. Ходовые испытания подтверждают



Рис. 4. Тормозная полуметаллическая колодка с чугунной вставкой марки «Фритекс-970/2»

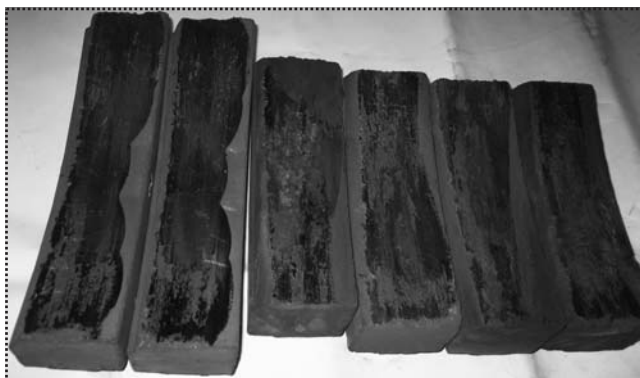


Рис. 5. Рабочие поверхности металлокерамических тормозных колодок длиной 250 и 320 мм после испытаний на инерционном стенде

положительное влияние этих колодок на колеса. Хорошие результаты показывают испытания композиционных тормозных колодок из материала ТИИР-300 с двумя разнесенными чугунными вставками, изготовленными на Тамбовском заводе АРТИ (рис. 6).

Во ВНИИЖТ совместно с ОАО «Фритекс» проводятся также работы по созданию и исследованиям металлокерамических тормозных колодок, которые имеют большую перспективу по применению на локомотивах. Об этом свидетельствуют результаты эксплуатации металлокерамических секционных тормозных колодок на десяти электровозах серии ЧС2<sup>Т</sup> в 2007 г. на Октябрьской ж. д.

### Вывод

Использование тормозных колодок из новых фрикционных материалов с нанодобавками и улучшенных конструкций, изготовленных по ресурсосберегающим технологи-

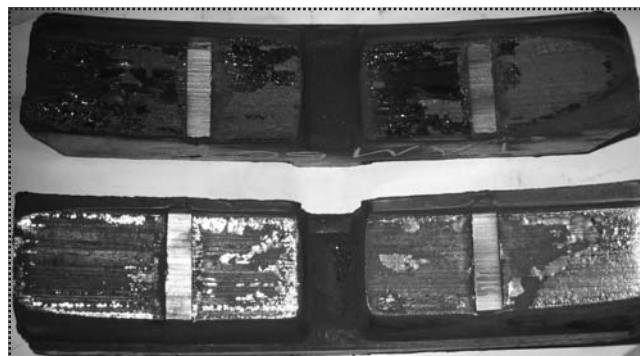


Рис. 6. Композиционная тормозная колодка из материала ТИИР-300 + АРТИ-830 с двумя разнесенными чугунными вставками

ям, дает возможность значительно сократить расход материальных и финансовых средств при торможении.

### Библиографический список

1. **Vukolov L.A., Voronchikhin A.I.** Damages of the Railway car wheel tread by composite brake shoes. 10<sup>th</sup> Nordic Symposium on Tribology Nordtrib 2002, Keynotes and Abstracts. Stockholm, Sweden, June 9-12, 2002. P. 204.
2. **Vukolov L.A.** The increase of the friction pairing service life: Railway wheel treadbrake shoe. 14<sup>th</sup> International Colloquium Tribology, TAE, Germany, January 13–15, 2004, V. 1. P. 491–494.
3. **Vukolov L.A.** Tribology performances of Railway brake shoes. Outlook on the Future. 16<sup>th</sup> International Colloquium Tribology, TAE, Germany, January 15–17, 2008, V. 1. P. 92.
4. **Vukolov L.A., Zharov V.A.** The estimation of the tribological sintered brake shoes properties. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium on friction products and materials. Yaroslavl, Russia, YAROFRI-2006, Sept. 5-7. P. 65–73.

### Контактные координаты автора

**Вуколов Леонид Александрович** — тел./факс: (495)542-68-01; e-mail: mnts@vniizht.ru.



УДК 678.5.046:621.762

С.Н. Шевцов, д-р техн. наук, И.Б. Сайко, А.А. Клименко канд-ты техн. наук,  
И.В. Овечкин (Южный научный центр РАН)

## Комбинированный подшипник скольжения

Разработана новая конструкция подшипника скольжения с комбинированной металлополимерной поверхностью. Предложенная конструкция отличается от аналогичных способностью удерживать смазку в рабочей зоне, что значительно снижает коэффициент трения, обеспечивая повышенную надежность и долговечность подшипника.

*A new design of a plane bearing with combined metal-polymeric surface is developed. The offered design differs from analogous models by ability to keep lubricant in the working zone that considerably reduces a friction coefficient, ensuring the enhanced reliability and life time of the bearing.*

**Ключевые слова:** металлополимерная композиция, металлопорошковая матрица, пусковой износ, остановочный износ, триботехническое исследование.

**Keywords:** metal-polymer composition. Metal powder matrix, set up wearability, punning out wearability, tribologic investigation.

Долговечность, экономичность, надежность, а во многих случаях и габаритные размеры машин зависят от конструкции опор трения, поэтому к подшипниковым узлам предъявляют повышенные требования, обусловленные увеличением частот вращения, статических и динамических нагрузок, а также необходимостью значительного увеличения надежности.

В подшипниках скольжения между валом и вкладышем возникают силы трения скольжения, уменьшение которых необходимо обеспечить, чтобы снизить непроизводительные затраты энергии и износ взаимодействующих деталей. Для этой цели разработано большое количество конструкций опор скольжения из различных материалов и с применением разнообразных смазочных средств [1, 2].

Основным недостатком современных опор трения является повышенный износ трущейся пары в момент пуска, обусловленный де-

фицитом смазочного материала в трибологическом контакте. Для решения проблемы удержания смазочного материала в зоне трения предложено большое число конструктивных решений [5], но они не позволяют существенно снизить пусковой износ.

Предлагаемая конструкция подшипника скольжения с комбинированной металлополимерной поверхностью трения (рис. 1) отличается от аналогичных конструкций тем, что рабочая поверхность подшипника покрывается регулярной сеткой полимерных выступов, образованных вставками. Предотвращая сухой контакт поверхностей вала и пористого подшипника, эти вставки оказывают демпфирующее действие, так как исключают жесткое динамическое контактирование металлических поверхностей подшипника и вала при пуске–выбеге (ПВ %) [3]. Средняя температура в контактной зоне составляет 47...52 °С.

Разработанный подшипник включает пористую матрицу, спеченную из металлических порошков (ЖГР1, 5Д2,5К0,8-П-20 %) и вставки, выполненные из полиамида ВА6 $\frac{210}{310}$  (рис. 2). Технология изготовления подшипника включает формирование и спекание



Рис. 1. Общий вид металлополимерного подшипника скольжения

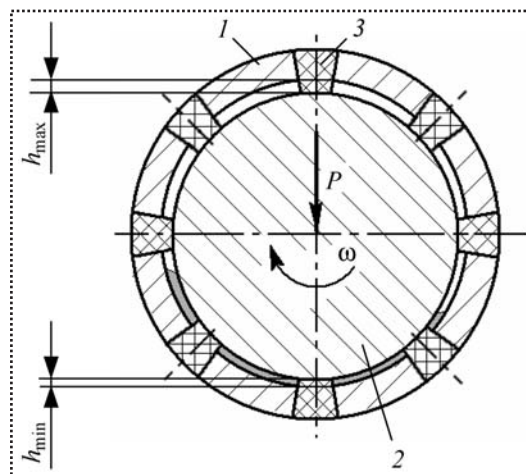


штулки (матрицы) необходимого размера. Далее на рабочей поверхности матрицы выполняют расположенные в узлах регулярной сетки конические отверстия заданного диаметра, сужающиеся от наружной поверхности к внутренней. На наружной поверхности матрицы выполняют бандажные канавки, связывающие отверстия и предотвращающие выдавливание вставок из матрицы. Штулка с предварительно сделанными отверстиями устанавливается в литейную пресс-форму и заливается полимером на литейной машине. Бандажные канавки также заполняются полимером, что способствует фиксации вставок. Полученную металлополимерную конструкцию пропитывают маслом в вакууме для лучшего заполнения пор.

Для обеспечения размерной точности и упругости рабочей поверхности подшипник запрессовывают в жесткую закаленную обойму и отверстие обрабатывают пластическим деформированием (дорнованием) с заданной степенью деформации. В результате различной величины пластических деформаций спеченной пористой матрицы и полимерного материала (пористая матрица при малых степенях деформации деформируется пластически, а полимер упруго) полимерные вставки выступают над рабочей поверхностью подшипника [3].

*Параметрами, определяющими работоспособность подшипников скольжения, являются температура и толщина разделительной смазочной пленки, образующейся в режиме жидкостной смазки. Обычно считают, что в подшипниках скольжения разделение трущихся поверхностей вкладыша и вала наступает при толщине смазочного слоя  $h_{\text{до}} = 0,1 \dots 0,3$  мкм. Работа таких подшипников устойчива при соблюдении условия  $h_{\text{мин}} \geq h_{\text{до}} + 2$  мкм.*

При возникновении критических нагрузок выступающие над матрицей полимерные выступы упруго деформируются, демпфируя эти нагрузки, после чего вал вступает в контакт с пористой матрицей. Контактное трение вы-



**Рис. 2.** Схема металлополимерного подшипника:

1 – пористая матрица; 2 – вал; 3 – полиамидные вставки;  $h_{\text{мин}}$ ,  $h_{\text{макс}}$  – соответственно минимальная и максимальная толщина смазочного слоя;  $P$  – нагрузка;  $\omega$  – угловая скорость

зывает разогрев матрицы, активируя выделение смазки из пор и ее поступление в зону трения, что создает устойчивую разделительную пленку в течение всего времени работы узла трения. Это способствует уменьшению тепловой напряженности подшипниковой пары и уменьшает интенсивность изнашивания ее элементов. Упруговосстанавливающие свою форму полимерные выступы являются армирующими элементами разделительной пленки. Их высота соизмерима с толщиной пленки и может меняться для различных конструкций и типоразмеров от единиц до 20 мкм [4].

При пуске вал, поддерживаемый полимером, не имеет непосредственного контакта с пористой матрицей, что исключает пусковой износ. Износ при выбеге устраняется за счет демпфирования и упругой поддержки вала полимером [6].

В отличие от известных подшипников на основе металлопорошковых штулок автоколебания в контакте вал – поверхность металлической матрицы, вызывающие повышенный износ, демпфируются за счет диссипативных свойств полимера и слоя смазки, стесненного полимерными выступами и бандажом. Этим обеспечивается уменьшение тепловой напря-

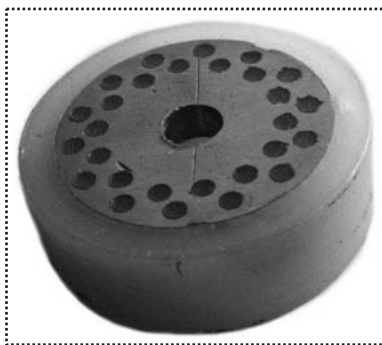


Рис. 3. Экспериментальный образец

женности зоны трения, исключение перегрева и деструкции полимера и в конечном счете повышение устойчивости и стабильности работы трибосистемы.

Изучение закономерностей изменения коэффициента трения и температуры металло-полимерного узла трения при варьировании скорости нагрузки, относительной площади и характера размещения полимерных выступов выполняли на физической модели комбинированной поверхности (рис. 3, 4), адаптированной к условиям испытаний на триботехническом испытательном комплексе Т11 (трение по схеме "палец-диск").

В процессе эксперимента регистрировали следующие параметры: силу трения, темпера-

туру, толщину масляной пленки. При испытаниях образец вращался вокруг своей оси. Прецизионное нагружающее устройство создавало нормальную нагрузку на контртело, в качестве которого использовали стальной стержень с плоским торцом, выполненный из стали 45 ГОСТ 1050–84. Регистрируемые параметры обрабатывали в реальном времени на компьютерной информационно-измерительной системе. Испытания проводили в диапазоне нагрузок 20...50 Н, скоростей 0,5...1,0 м/с, пути трения 3000...6000 м.

В процессе исследований установлено, что процесс трения существенно зависит от отношения площади полимера к площади металлической поверхности, названный коэффициентом топологии:

$$K_{\delta} = \frac{S_{ii\epsilon}}{S_{ii\delta}}$$

где  $S_{ii\epsilon}$  – площадь полимерной поверхности трибосистемы;

$S_{ii\delta}$  – площадь пористой металлической поверхности.

Конструкция образцов для испытаний была такой, что полимерные выступы одинакового диаметра размещались с равным шагом на concentрических окружностях. Так, количество и, следовательно, относительная площадь полимерных выступов на этих окружностях были различны, перемещение металлического контртела по радиусу образца позволило моделировать различные значения коэффициента топологии ( $K_{\delta} = 0,600; 0,465; 250$ ).

Результаты измерений представлены на рис. 5 и 6 в виде двумерных зависимостей силы трения и толщины смазочной пленки от параметра  $rv$  и коэффициента топологии  $K_{\delta}$ . Экспериментальные точки были сглажены полиномиальными зависимостями.

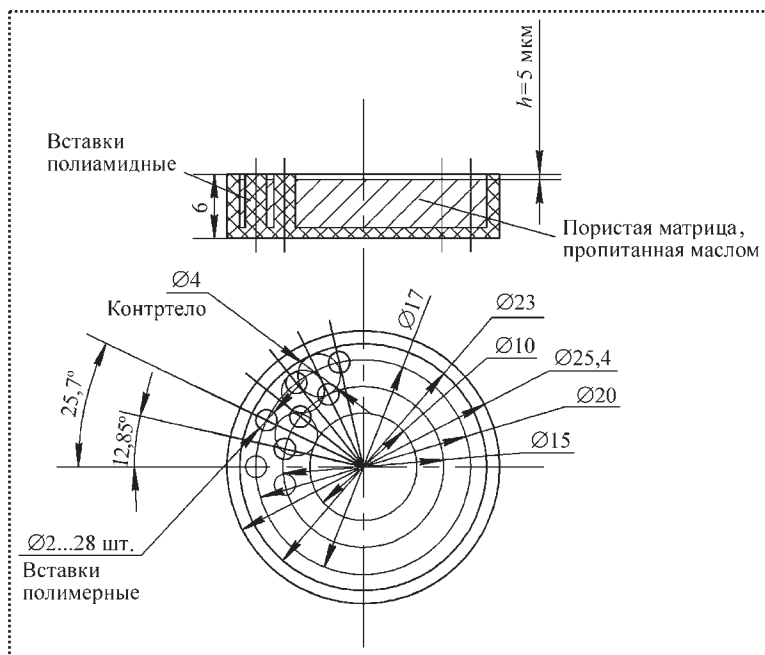


Рис. 4. Эскиз комбинированной трибоповерхности образца

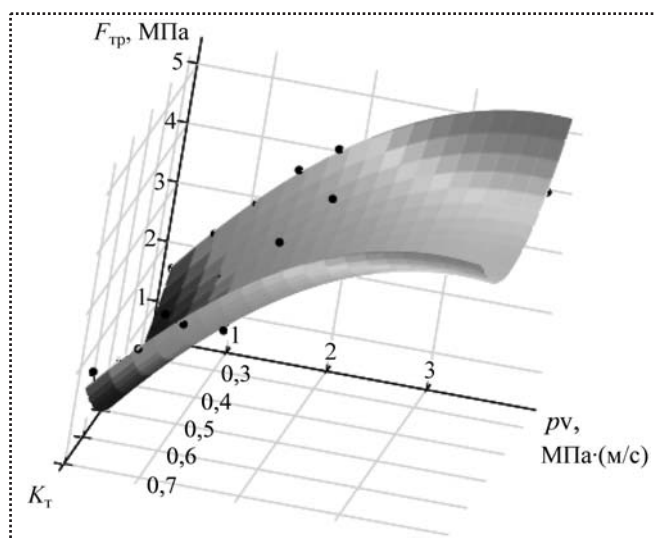


Рис. 5. Зависимость силы трения от параметра  $pv$  и коэффициента топологии  $K_t$

Как следует из рис. 5, при всех исследованных нагрузках сила трения имеет минимум, соответствующий  $K_\delta \sim 0,55$ , причем большим нагрузкам отвечает больший выигрыш в силе трения за счет оптимизации соотношения  $K_\delta$ . Так, при параметрах  $pv = 0,5$  МПа (м/с) значению  $K_\delta = 0,2$  соответствует  $F_{\delta\delta} = 2,5$ , а оптимальному  $K_\delta = 0,55$  – величина силы  $F_{\delta\delta} = 0,8$ , т.е. на 68 % меньше.

Наблюдение развития во времени толщины смазочной пленки показало, что она увеличивается первые две минуты пути трения, а

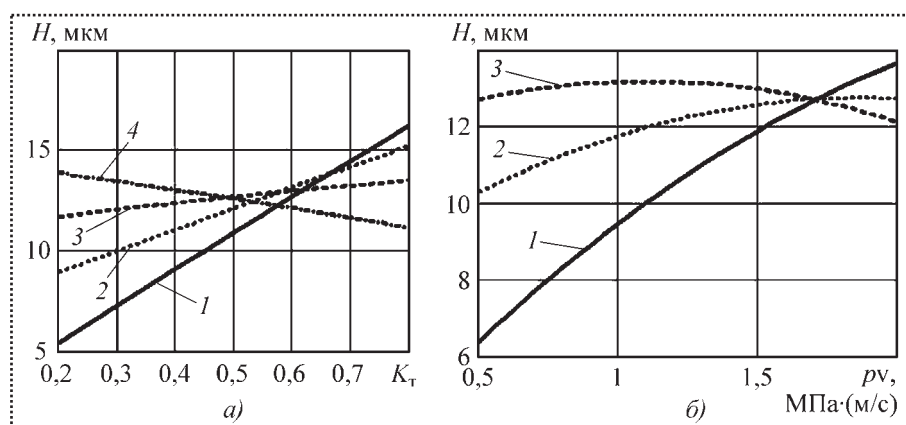


Рис. 6. Зависимость толщины масляной пленки:  
 а – от коэффициента топологии  $K_t$  при параметрах  $pv$  [МПа(м/с)], равных: 1 – 0,5; 2 – 1,0; 3 – 1,5; 4 – 2,0;  
 б – от параметра  $pv$  при значениях  $K_t$ , равных: 1 – 0,25; 2 – 0,465; 3 – 0,6

затем стабилизируется, если режимы работы трибоузла далеки от критических значений. Зависимости, представленные на рис. 6, также демонстрируют наличие оптимального соотношения  $K_\delta$ , при котором толщина разделительной пленки стабильна, т.е. практически не зависит от нагрузки. Так же как и для коэффициента трения, оптимальное значение  $K_\delta = 0,5 \dots 0,6$ . Полученный результат имеет эмпирический характер и в силу сложности процесса трения, по-видимому, не может быть интерпретирован в рамках простых представлений. Однако он может быть использован как рекомендация при проектировании составных металлополимерных подшипников скольжения.

### Выводы

Разработанная конструкция подшипника скольжения с комбинированной металлополимерной поверхностью трения, покрытой регулярной сеткой полимерных выступов, образованных вставками, предотвращает сухой контакт поверхностей вала и пористого подшипника при пуске.

Полимерные вставки оказывают демпфирующее действие, исключая жесткое динамическое контактирование металлических поверхностей подшипника и вала при пуске–останове, критических и нестационарных нагрузках.

Повышение температуры узла трения вызывает расширение масла, находящейся в порах матрицы, выполненной из металлических порошков, усиленное его поступление в зону трения, обеспечивая автоматическое поддержание температурного режима.

Триботехническими исследованиями установлено оптимальное соотношение площадей металла и полимера на контактной по-



верхности подшипника скольжения. Это соотношение характеризуется максимальной стабильностью толщины разделительной масляной пленки и минимальным коэффициентом трения при вариации рабочих нагрузок.

Упорные подшипники описанной конструкции устойчиво работают три месяца в режиме граничной смазки в опорах дозирующего насоса при  $PV = 70 \%$ .

#### Библиографический список

1. Черешкевич Л.В. и др. Фторопластовые подшипники, работающие без смазки. — Л.: ЛДНТП, 1959, 31 с.
2. Спицын Н.А. Конструкции и режимы работы самосмазывающихся подшипников без подвода жидкой смазки // Трубы ВНИПП, № 2, М., 1963. С. 21–33.

3. Патент на полезную модель № 60155. Подшипник скольжения. Авторы: Рыжкин А.А., Шевцов С.Н., Зориев И.А., Сайко И.Б. Заявка № 2006109727. Приоритет 27 марта 2006. Зарегистрирован 10 января 2007.

4. Снеговский Ф.Г. Экспериментальная проверка некоторых основных положений гидродинамической теории смазки подшипников скольжения и новая методика их расчета. Повышение износостойкости и срока службы машин. Тезисы докладов. К.: ИПМ АН УССР. Вып. 1. 1970. С. 169.

5. Патент на полезную модель № 64302. Подшипник скольжения. Автор: Зориев И.А. Заявка № 2007105245. Приоритет 12 февраля 2007 г. Зарегистрировано 27 июня 2007.

6. Шевцов С.Н., Сайко И.Б., Зориев И.А. и др. Подшипники скольжения с комбинированной поверхностью. — В кн: Труды VIII Международной научно-технической конференции по динамике технологических систем. Том II. Ростов-на-Дону, 2007.

#### Контактные координаты авторов

**Шевцов Сергей Николаевич** — заведующий лабораторией «Машиностроение и высокие технологии» Южного научного центра РАН; тел.: (863) 738-712, 72-75-66; e-mail: [aeroengdstu@list.ru](mailto:aeroengdstu@list.ru).

**Клименко Анна Александровна** — научный сотрудник Южного научного центра РАН; тел.: (863) 279-69-14; e-mail: [klimann@mail.ru](mailto:klimann@mail.ru).

**Сайко Игорь Борисович** — старший научный сотрудник Южного научного центра РАН; тел.: (863) 251-96-64.

**Овечкин Игорь Викторович** — аспирант ДГТУ; тел.: 8928-296-253; e-mail: [orbitalux@mail.ru](mailto:orbitalux@mail.ru).

ООО "Издательство Машиностроение", 107076, Москва, Стромьинский пер., 4  
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение".

Адрес электронной почты издательства: E-mail: [mashpubl@mashin.ru](mailto:mashpubl@mashin.ru); редакции журнала: [tsmm@mashin.ru](mailto:tsmm@mashin.ru); [sborka@mashin.ru](mailto:sborka@mashin.ru); [www.mashin.ru](http://www.mashin.ru)

Телефон редакции журнала: 8(499) 268-38-42; тел./факс 8(499) 268-85-26; факс: 8(499)269-48-97.

Технический редактор *Андреева Т.И.* Корректоры *Сажина Л.И.*, *Сонюшкина Л.Е.*

Сдано в набор 01.12.09 г. Подписано в печать 15.02.10 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 5,61. Заказ 98. Свободная цена.

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство Машиностроение".  
Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, д. 15.