ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ

ЖУРНАЛ ВХОДИТ В ПЕРЕЧЕНЬ УТВЕРЖДЕННЫХ ВАК РФ ИЗДАНИЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИЙ ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ

2018 Том 19 **2 (211)**

СОДЕРЖАНИЕ

Сборочное оборудование и его элементы

Житников Ю.З., Житников Б.Ю., Степанов А.С. Обоснование параметров устройств и режимов движения поворотной платформы двухшпиндельного шпильковерта 51

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Гречников Ф.В., Яковишин А.С., Захаров О.В. Минимизация объема измерений плоских поверхностей деталей при сборке 56

Матвеев И.А., Ямников А.С., Ямникова О.А. Влияние погрешностей базовой детали на погрешности сборки протяженных осесимметричных корпусов 59

Трение и смазка в машинах и механизмах

Меделяев И.А. Процессы в зоне контакта трибологических систем 64

Мигранов М.Ш., Шехтман С.Р., Мигранов А.М. Исследование многослойных композиционных покрытий для режущего инструмента 74

Ноженков М.В. Вихревые потоки в диссипативных системах 77

В помощь конструктору, технологу

Гурьянов Г.Н., Платов С.И., Огарков Н.Н., Шеметова Е.С. Запрессовка рабочего вкладыша инструмента как способ повышения его прочности при волочении проволоки 92

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Пресса России" — **84967**) или непосредственно в издательстве

Тел.: 8 (499) 269-54-98, 269-54-96

E-mail: sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru

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

Председатель редакционного совета

В.И. КОЛЕСНИКОВ, *академик РАН*

Редакционный совет

МОСКВА

А.С. ВАСИЛЬЕВ (главный редактор), д.т.н., проф.
В.В. БАРДУШКИН, д.ф.-м.н.
И.А. БУЯНОВСКИЙ, д.т.н., проф.
М.В. ВАРТАНОВ, д.т.н., проф.
А.А. ГУСЕВ, д.т.н., проф.
С.М. ЗАХАРОВ, д.т.н.
И.Н. ЗИНИНА, к.т.н., доц.
Ю.Л. ИВАНОВ, д.т.н.
А.В. ИГНАТОВ, к.т.н., доц.
Ю.Г. КОЗЫРЕВ, к.т.н.
А.И. КУМЕНКО, д.т.н., проф.
И.А. ЛЮБИНИН, к.т.н.
Е.А. МИКРИН, д.т.н., акад. РАН
Б.В. ШАНДРОВ, к.т.н., проф.
А.Г. ХОЛОДКОВА, к.т.н., проф.

Региональные редсоветы

БЕЛГОРОД

Н.А. ПЕЛИПЕНКО, д.т.н.

БРЯНСК

О.А. ГОРЛЕНКО, д.т.н., проф.

ВЛАДИВОСТОК

Ю.Н. КУЛЬЧИН, акад. РАН
А.А. СУПОНЯ, к.т.н.

ВОЛГОГРАД

М.Г. КРИСТАЛЬ, д.т.н., проф.
В.И. ЛЫСАК, акад. РАН
В.М. ТРУХАНОВ, д.т.н., проф.

ИЖЕВСК

И.В. АБРАМОВ, д.т.н., проф.
В.Г. ОСЕТРОВ, д.т.н., проф.
Б.А. ЯКИМОВИЧ, д.т.н., проф.

КАЗАНЬ

Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

КОВРОВ

Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ

Б.Н. МАРЬИН, д.т.н.
А.М. ШПИЛЕВ, д.т.н., проф.

НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ

С.В. ДМИТРИЕВ, д.т.н.
Р.М. ХИСАМУТДИНОВ, к.т.н.

НИЖНИЙ НОВГОРОД

С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

ОРЕЛ

Ю.С. СТЕПАНОВ, д.т.н., проф.
Г.А. ХАРЛАМОВ, д.т.н., проф.

ОРЕНБУРГ

А.Н. ПОЛЯКОВ, д.т.н., проф.
А.И. СЕРДЮК, д.т.н., проф.
А.П. ФОТ, д.т.н., проф.

ПЕРМЬ

С.М. БЕЛОБОРОДОВ, д.т.н.
В.Ф. МАКАРОВ, д.т.н.

РОСТОВ-НА-ДОНУ

А.А. РЫЖКИН, д.т.н., проф.

РЫБИНСК

В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ, д.т.н., проф.
В.В. НЕПОМИЛУЕВ, д.т.н., проф.
А.Н. СЕМЕНОВ, д.т.н., проф.

САМАРА

Ю.А. ВАШУКОВ, к.т.н., доц.
М.А. ЕВДОКИМОВ, д.т.н., проф.

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

Е.В. ШАЛОБАЕВ, к.т.н., проф.

СЕВАСТОПОЛЬ

Е.Л. ПЕРВУХИНА, д.т.н., проф.

ТОМСК

А.В. КОЛУБАЕВ, д.ф.-м.н.
В.Е. ПАНИН, акад. РАН

ТУЛА

А.А. МАЛИКОВ, д.т.н., проф.
В.В. ПРЕЙС, д.т.н., проф.

ХАБАРОВСК

В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.

Беларусь

МИНСК

В.Л. БАСИНЮК, д.т.н.
М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.

ГОМЕЛЬ

В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н.

Украина

КИЕВ

А.С. ЗЕНКИН, д.т.н., проф.
В.А. МАТВИЕНКО, к.т.н.

ДОНЕЦК

А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

Польша

П. ЛЕБКОВСКИ, д.т.н.
Е. ЛУНАРСКИ, д.т.н.

Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Е.М. НУЖДИНА, И.М. ГЛИКМАН

Журнал зарегистрирован в РОСКОМНАДЗОРе. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-63953 от 09.12.2015 г.

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Сборка в машиностроении, приборостроении", 2018

sb218.indd 49 02.02.2018 11:19:25

THE MONTHLY
JOURNAL
FOR SCIENTISTS
AND MANUFACTURERS

ASSEMBLING
IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

THE JOURNAL IS PUBLISHED UNDER THE PATRONAGE OF INTERNATIONAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERING
THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY RF FOR DISSERTATION PUBLICATION

2018 Vol. 19
2 (211)

CONTENTS

Production tools and machinery for assembly

Zhitnikov Yu.Z., Zhitnikov B.Yu., Stepanov A.S. Justification of the parameters of devices and modes of motion of the rotary platform of a two-spindle studdriver 51

Quality assurance. Testing. Monitoring

Grechnikov F.V., Yakovishin A.S., Zakharov O.V. Minimizing the number of measurements of flatness parts during assembly 56
Matveyev I.A., Yamnikov A.S., Yamnikova O.A. Effect of errors in the base part on the error of assembling extended axle-symmetric bodies 59

Friction & lubrication in machines and mechanisms

Medeljaev I.A. Processes in the contact zone of tribological systems 64
Migranov M.Sh., Shekhtman S.R., Migranov A.M. Investigation of multilayer composite coatings for cutting tools 74
Nozhenkov M.V. Vortex flows in dissipative systems 77

Industrial and design engineer's aid

Guryanov G.N., Platov S.I., Ogarkov N.N., Shemetova E.S. Reinforcement of the working insert of the tool as a method of increasing its strength with a wire of wire 92

Journal is distributed on subscription, whith can be issues in any post office (index on the catalogue of the "Pressa Rossii" — **84967**) or directly in editorial of the journal.
Ph.: 8 (499) 269-54-98, 269-54-96
E-mail: sborka@machin.ru, http://www. mashin.ru
The reference to the Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making Journal during reprint of the materials is mandatory.
Advertisers are responsible for the content of their advertisements.

Chair of Editorial Advisory Board —
Member of Russian Academy of Science
V.I. KOLESNIKOV

Editors
MOSCOW
A.S. VASIL'EV (Chief editor)
V.V. BARDUSHKIN
I.A. BUYANOVSKY
M.V. VARTANOV
A.A. GUSEV
S.M. ZAKHAROV
I.N. ZININA
Yu.L. IVANOV
A.V. IGNATOV
Yu.G. KOZYREV
A.I. KUMENKO
I.A. LUBININ
E.A. MIKRIN
B.V. SHANDROV
A.G. KHOLODKOVA

Regional editors
BELGOROD
N.A. PELIPENKO
BRIANSK
O.A. GORLENKO
VLADIVOSTOK
Yu.N. KULSHIN
A.A. SUPONIA
VOLGOGRAD
M.G. KRISTAL
V.I. LYSAK
V.M. TRUKHANOV
IZHEVSK
I.V. ABRAMOV
V.G. OSETROV
B.A. YAKIMOVICH
KAZAN
R.I. ADGAMOV
KOVROV
Yu.Z. ZHITNIKOV
KOMSOMOLSK-ON-AMUR
B.N. MARJIN
A.M. SHPILEV
NABEREZHNYE CHELNY
S.V. DMITRIEV
R.M. KHISAMUTDINOV
NIZHNY NOVGOROD
S.V. GOLUBEV
OREL
Yu.S. STEPANOV
G.A. KHARLAMOV
ORENBURG
A.N. POLYAKOV
A.I. SERDUK
A.P. FOT
PERM
S.M. VELOBORODOV
V.F. MAKAROV
ROSTOV-ON-DON
V.I. KOLESNIKOV
A.A. RYZHKIN
RYBINSK
V.F. BEZIAZYCHNYI
V.V. NEPOMILUEV
A.N. SEMENOV
SAMARA
Yu.A. VASHUKOV
M.A. EVDOKIMOV
ST.-PETERSBURG
E.V. SHALOBAEV
SEVASTOPOL
E.L. PERVUKHINA
TOMSK
A.V. KOLUBAEV
V.E. PANIN
TULA
A.A. MALIKOV
V.V. PREYS
KHABAROVSK
V.I. SCHPORT
Belarus
MINSK
V.L. BASINJUK
M.L KHEIFETZ
GOMEL
V.E. STARZHINSKI
Ukraine
KIEV
A.S. ZENKIN
V.A. MATVIENKO
DONETSK
A.N. MIKHAILOV
Poland
P. LEBKOVSKI
E. LUNARSKII

Executive editors of current issue:
E.M. NUZHDINA, I.M. GLIKMAN

The journal is registered by ROSKOMNADZOR.
Registration certificate ПИ № ФС 77-63953. 09.12.2015

© "Innovative Mashinostroenie" Publishers, "Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making", 2018

sb218.indd 50 02.02.2018 11:19:29

УДК 621.88.087

Ю.З. Житников, *д-р техн. наук ("КГТА им. В.А. Дегтярева", г. Ковров),*
Б.Ю. Житников, *д-р техн. наук (ВЮИ, г. Владимир),*
А.С. Степанов *("ОАО завод им. В.А. Дегтярева", г. Ковров)*
E-mail: kgta_tms@mail.ru

Обоснование параметров устройств и режимов движения поворотной платформы двухшпиндельного шпильковерта

Приведены кинематическая схема двухшпиндельного шпильковерта и обоснование некоторых параметров устройства и предельных режимов движения поворотной планшайбы.

A kinematic scheme of a double-spindle studdriver is given and a substantiation of some device parameters and limiting modes of motion of the rotary faceplate.

Ключевые слова: двухшпиндельный шпильковерт, режимы движения, поворотная планшайба, параметры устройства.

Keywords: two-spindle studdriver, motion modes, rotary faceplate, device parameters.

Двухшпиндельный шпильковерт с поворотной планшайбой входит в автоматический комплекс сборки механизма управления переключением передач автомобилей (рис. 1) [1, 2].

Устройство состоит из несущей плиты *17*, на которой установлен бункер-накопитель шпилек *18*. В плиту запрессованы втулки *14* направляющих штанг *13*, снабженных пружинами *11* и закрепленных на раме *12* держателя *8*. Через распорные втулки держатель *8* шарнирно соединен со штоком *22* пневмоцилиндра *21*, выполненного за единое целое с пневмоцилиндром *20*, а его шток *19* также шарнирно соединен с несущей плитой *17*. На держателе *8* в подшипниках *9* установлена планшайба *10*, на которой сверху закреплены два шпильковерта *24* с патронами *25*. Снизу к держателю прикреплена пара неподвижных втулок *7* с насаженными на них подвижными втулками *4* и пара неподвижных втулок *6* с насаженными на них подвижными втулками *3*. Втулки *3* и *4* поджаты пружинами (условно не показаны). От бункера-накопителя *18* к втулкам *7* подведены шпильководы *16* в виде витых цилиндрических пружин, а к втулкам *6* — шпильководы *15*. Планшайба *10* через стойку *30* соединена со штоком пневмоцилиндра *23*, установленного на держателе *8* и служащего для поворота планшайбы. В держатель *8* запрессованы втулки *26* направляющих штанг *28*, закрепленных на кондукторной плите *29*, и поджатых пружинами *27*. В плите *29* установлены четыре кондукторные втулки *2* и два базирующих штифта *1*.

Устройство работает следующим образом. В исходном положении держатель *8* и кондукторная плита *29* подняты. Под плиту *29* подается собираемый узел. Сжатый воздух поступает в нижнюю полость пневмоцилиндра *20*, шток *19* которого прикреплен к несущей плите *17*. Гильза пневмоцилиндра *20* опускается вместе с пневмоцилиндром *21*, который через шток *22* и планку *12* перемещает вниз штанги *13* во втулках *14* и держатель *8*. При опускании держателя *8* кондукторная плита *29* базируется относительно узла, жестко закрепленного в спутнике. При этом плита доориентирует узел коническими штифтами *1*, направляющие штанги *28* перемещаются по втулкам, а пружины *27* сжимаются. Подвижные втулки *4* центрируются направляющей поверхностью лотков относительно наружной цилиндрической поверхности двух диаметрально противоположных кондукторных втулок *2*. В этот момент две шпильки из бункера-накопителя *18* поступают в шпильководы *16*,

sb218.indd 51 02.02.2018 11:19:29

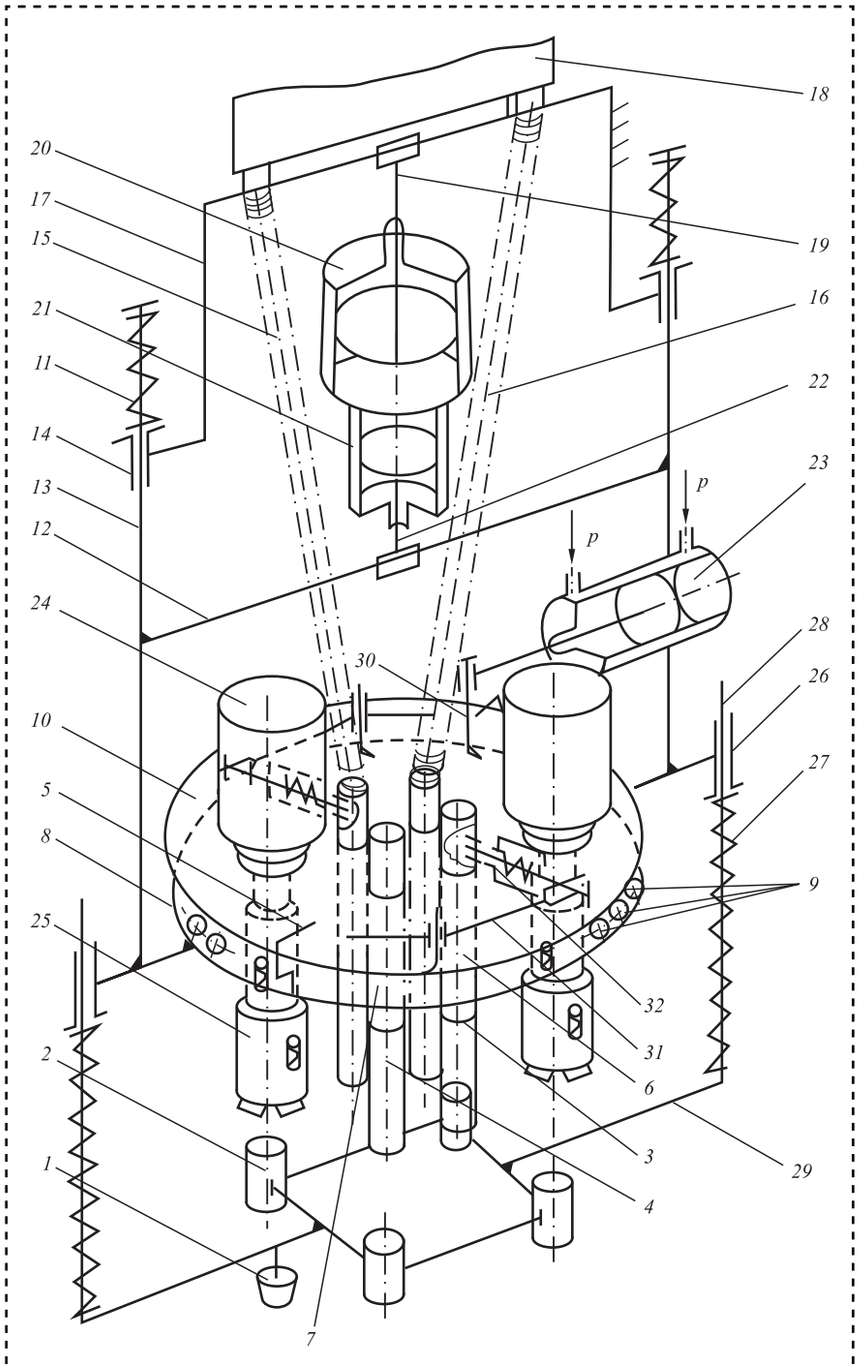

Рис. 1. Схема двухшпиндельного шпильковерта

по которым они попадают в отверстия втулок *7* и далее в две кондукторные втулки *2*, а две другие — во втулки *6*, удерживаясь от выпадания отсекателями *32*.

Сжатый воздух подается в правую полость пневмоцилиндра *21*, шток которого поворачивает планшайбу *10* в подшипниках *9* на необходимый угол. При повороте планшайбы *10* подвижные втулки *4* отводятся от пары кондукторных втулок *2*, не задевая шпилек, а подвижные втулки *3* устанавливаются соосно отверстиям другой пары кондукторных втулок *2*, центрируясь лотками относительно их наружной цилиндрической поверхности, отсекатели *32* открывают проход шпилек, которые выпадают во втулки *2*. При этом патроны *23* шпильковертов *24* располагаются над двумя шпильками, поданными ранее в кондукторные втулки *2*.

После поворота планшайбы *10* подается воздух в верхнюю полость пневмоцилиндра *21* и одновременно включаются шпильковерты *24*. Держатель *8* опускается. Патроны *25* захватывают шпильки, автоматически наживляют и завинчивают их в деталь.

По окончании завинчивания пары шпилек шпильковерты *24* отключаются. Затем подается воздух в нижнюю полость пневмоцилиндра *21*. Держатель *8* поднимается, а патроны *25* снимаются с завинченных шпилек, при этом кондукторная плита *29* удерживается на детали пружинами *27*. Далее воздух подается в левую полость пневмоцилиндра *23*. Его шток возвращает планшайбу *10* в исходное положение, при котором патроны *25* располагаются над второй парой поданных шпилек. Втулки *4* базируются относительно кондукторных втулок *2*. Затем воздух вновь подается в верхнюю полость пневмоцилиндра *21* и включаются шпильковерты *24*. Держатель *8* опускается, патроны *25* захватывают вторую пару шпилек, наживляют и завинчивают их. После завинчивания шпилек шпильковерты *24* отключаются, подается воздух сначала в нижнюю полость пневмоцилиндра *21*, а затем в верхнюю полость пневмоцилиндра *20*. В результате этого держатель *8* сначала приподнимается, снимая патроны *25* с завинченных шпилек, а потом вместе с кондукторной плитой *29* занимает исходное положение. Узел с завинченными шпильками удаляется,

sb218.indd 52 02.02.2018 11:19:29

а на его место конвейером подается следующий. Рабочий цикл повторяется.

Поворотная планшайба возвращается в исходное положение после завинчивания шпилек под действием пружин пневмоцилиндра, поэтому необходимо знать жесткость пружины.

При возвращении планшайбы в исходное положение сила упругости $F_{пр}$ должна преодолеть: трение планшайбы в направляющих основания — $F_{тр_1}$; трение штока об уплотнительные кольца — $F_{тр_2}$; трение уплотнительных колец поршня о внутренние стенки пневмоцилиндра — $F_{тр_3}$:

$$F_{пр} = F_{тр_1} + F_{тр_2} + F_{тр_3}. \quad (1)$$

Сила трения планшайбы:

$$F_{тр_1} = Nf = \sigma_\Sigma, \quad (2)$$

где N — сила нормального давления планшайбы на направляющие;

σ_Σ — суммарный вес планшайбы, завинчивающих устройств, трубок выдачи шпилек;

f — коэффициент трения.

Сила трения уплотнительных колец равна [4,5]:

$$F_{тр_1} = p_{k_2} S_2 f; \quad (3)$$

$$F_{тр_2} = p_{k_3} S_3 f, \quad (4)$$

где p_{k_2}, p_{k_3} — контактные давления на уплотнение;

S_2, S_3 — площади взаимодействия уплотнений с поверхностями пневмоцилиндра.

Контактное давление уплотнительных колец зависит от коэффициента деформации уплотнения [4]:

$$\varepsilon = \frac{d - H}{d} 100\ \%, \quad (5)$$

где d — диаметр сечения кольцевого уплотнения;

H — глубина канавки под уплотнение;

Δ — выступающая часть уплотнения над цилиндрической поверхностью, $\Delta = d - H$;

$$H = \frac{D_п - d_3}{2}, \quad (6)$$

где $D_п$ — диаметр цилиндрической поверхности пневмоцилиндра или штока;

d_3 — внутренний диаметр канавки под уплотнение.

Для резиновых уплотнений график зависимости $p_k = f(\varepsilon)$ представлен на рис. 2 [4, 5].

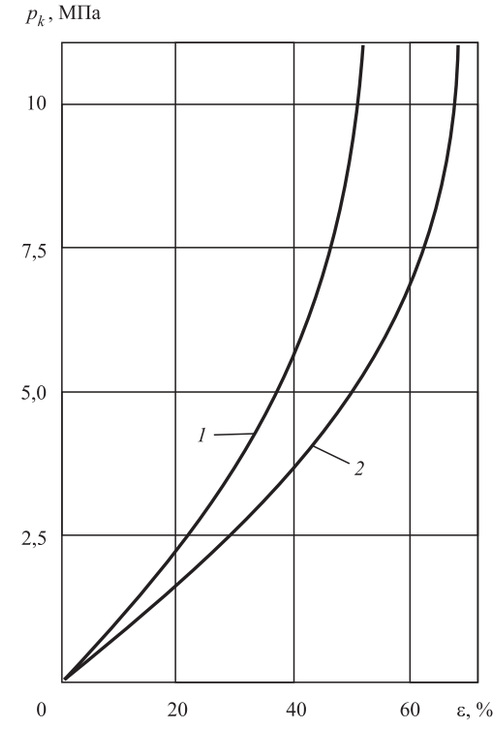

Рис. 2. График зависимости $p(R) = f(\varepsilon)$ для кольцевых уплотнений:
1 — круглого сечения; *2* — прямоугольного сечения

Площадь соприкосновения уплотнения с цилиндрической поверхностью находят из выражения:

$$S = 2\pi D_п \sqrt{d\Delta - \Delta^2}. \quad (7)$$

Необходимое условие надежного возвращения планшайбы в исходное положение под действием пружины пневмоцилиндра:

$$F_{пр} > F_{тр_1} + F_{тр_2} + F_{тр_3}. \quad (8)$$

С учетом коэффициента запаса силы k получим:

$$F_{пр} = k\left(F_{тр_1} + F_{тр_2} + F_{тр_3}\right). \quad (9)$$

Учитывая, что планшайба окончательно должна возвратиться в исходное, крайнее положение до упора под действием силы пружины, определяемой ее предварительной деформацией $\Delta\lambda$, выражение (9) можно записать:

$$C\Delta\lambda = k\left(F_{тр_1} + F_{тр_2} + F_{тр_3}\right), \quad (10)$$

где C — жесткость пружины.

Окончательно получим:

$$C = \frac{k\left(F_{тр_1} + F_{тр_2} + F_{тр_3}\right)}{\Delta\lambda}. \quad (11)$$

sb218.indd 53 02.02.2018 11:19:29

Поворот планшайбы в положение завинчивания двух остальных шпилек происходит под действием пневмоцилиндра.

В процессе завинчивания и затяжки шпилек под действием их моментов планшайба может повернуться и от перекоса заклинить шпильки в отверстиях собираемого узла.

Необходимое условие удержания планшайбы от поворота:

$$\left(F_{\text{пц}} - F_{\text{пр}}\right) R_{\text{п}} > 2M_{\text{з}}, \tag{12}$$

где $M_{\text{з}}$ — момент затяжки шпилек;

$R_{\text{п}}$ — радиус планшайбы.

Сила пневмоцилиндра

$$F_{\text{пц}} = [p]\frac{\pi D_{\text{п}}^2}{4},$$

где $[p]$ — давление сжатого воздуха в малые трали.

С учетом выражения (12) и коэффициента запаса момента k_1 выражение (11) примет вид:

$$\left([p]\frac{\pi D_{\text{п}}^2}{4} - C\Delta\lambda\right) R_{\text{п}} = k_1^2 M_{\text{з}}. \tag{13}$$

Требуемый диаметр пневмоцилиндра для удержания планшайбы от поворота найдем из выражения (13):

$$D_{\text{п}} = \sqrt{\frac{4\left(2k_1 M_{\text{з}} + C\Delta\lambda\right)}{[p]\pi}}. \tag{14}$$

Определим предельную скорость поворота планшайбы под действием силы пневмоцилиндра с учетом удара о неподвижный упор.

Воспользуемся дифференциальным уравнением вращательного движения в проекции на ось вращения [3]:

$$I_z\ddot{\varphi} = \sum M^e_{j(z)}, \tag{15}$$

где I_z — приведенный момент инерции планшайбы и элементов жестко скрепленных с ней;

$\ddot{\varphi}$ — проекция углового ускорения на ось вращения;

$\sum M^e_{j(z)}$ — суммарный момент внешних сил, действующих на планшайбу относительно ее оси вращения.

На планшайбу действуют силы:

пневмоцилиндра:

$$F_{\text{пц}} = [p]\frac{\pi d_{\text{п}}^2}{4}, \tag{16}$$

где $[p]$ — давление сжатого воздуха;

$d_{\text{п}}$ — внутренний диаметр пневмоцилиндра:

упругости пружины:

$$F_{\text{пр}} = C\left(\Delta\lambda + x\right), \tag{17}$$

где C — жесткость пружины;

$\Delta\lambda$ — предварительная деформация пружины;

x — текущее перемещение поршня;

вязкого трения планшайбы о направляющую основания:

$$R_{\text{тр}} = b\dot{\varphi}, \tag{18}$$

где b — коэффициент вязкого трения;

$\dot{\varphi}$ — угловая скорость поворота планшайбы.

С учетом выражений (16)—(18) дифференциальное уравнение (15) примет вид:

$$I_z\dot{\varphi} = [p]\frac{\pi d_{\text{п}}^2}{4} R_{\text{п}} - C\left(\Delta\lambda + x\right) R_{\text{п}} - b\dot{\varphi}R_{\text{п}}, \tag{19}$$

где $R_{\text{п}}$ — радиус планшайбы.

Так как x — это длина дуги поворота планшайбы, то:

$$x = \varphi R_{\text{п}}, \tag{20}$$

где φ — текущее значение угла поворота планшайбы.

С учетом выражения (20) после преобразования дифференциальное уравнение примет вид:

$$\ddot{\varphi} + \frac{bR_{\text{п}}}{I_z}\dot{\varphi} + \frac{CR_{\text{п}}^2}{I_z}\varphi = [p]\frac{\pi d_{\text{п}}^2}{4} R_{\text{п}} - \frac{C\Delta\lambda R_{\text{п}}}{I_z} R_{\text{п}}. \tag{21}$$

Введем обозначения:

$2n$ — коэффициент при $\dot{\varphi}$, где n — приведенное сопротивление;

k^2 — коэффициент при φ, где k — круговая частота;

A — правая часть уравнения.

Тогда уравнение (21) примет вид:

$$\ddot{\varphi} + 2n\dot{\varphi} + k^2\varphi = A. \tag{22}$$

В результате решения дифференциального уравнения с учетом большого сопротивления $k^* = \sqrt{n^2 - k^2}$ и нулевых начальных условий закон движения планшайбы запишется:

$$\varphi = e^{-nt} \times \left[\frac{A}{k^2}\left(1 - \frac{n}{2k^*}\right)e^{-k^*t} + \frac{A}{2k^2}\left(\frac{n}{k^*} - 1\right)e^{-k^*t}\right] + \frac{A}{k^2}. \tag{23}$$

А закон изменения скорости поворота планшайбы примет вид:

sb218.indd 54 02.02.2018 11:19:29

$$\dot{\varphi} = -ne^{-nt} \times$$
$$\times\left[\frac{A}{k^2}\left(1-\frac{n}{2k^*}\right)e^{k^*t}+\frac{A}{2k^2}\left(\frac{n}{k^*}-1\right)e^{-k^*t}\right]+$$
$$+e^{-nt}e^{k^*t}\frac{A}{k^2}\left(1-\frac{n}{2k^*}\right)k^*- \quad (24)$$
$$-e^{-nt}e^{k^*t}\frac{A}{2k^*}\left(\frac{n}{k^*}-1\right)k^*.$$

Время поворота планшайбы найдем графическим способом путем построения зависимости (23) и определения соответствия времени на графике повороту планшайбы на угол φ_0.

Определим предельную скорость поворота планшайбы во второе положение под действием пружины.

Воспользуемся дифференциальным уравнением (15) вращательного движения в проекции на ось вращения.

На планшайбу действуют моменты сил:

$$M_{\text{пр}} = C(\Delta\lambda + S - x)R_{\text{п}}, \quad (25)$$

$$M_{\text{тр}} = b\dot{\varphi}R_{\text{п}}. \quad (26)$$

Тогда дифференциальное уравнение вращательного движения (15) примет вид:

$$I_z\ddot{\varphi} = C(\Delta\lambda + S - \varphi R_{\text{п}}) - b\dot{\varphi}R_{\text{п}}. \quad (27)$$

Преобразуя уравнение (27), получим:

$$\ddot{\varphi} + \frac{bR_{\text{п}}}{I_z}\dot{\varphi} + \frac{CR_{\text{п}}^2}{I_z}\varphi = \frac{C(\Delta\lambda + S)I_z}{I_z}. \quad (28)$$

Введем обозначения:

$2n$ — коэффициент при $\dot{\varphi}$;

k^2 — коэффициент при φ;

A — правая часть уравнения.

Тогда уравнение (28) примет вид:

$$\ddot{\varphi} + 2n\dot{\varphi} + k^2\varphi = A. \quad (29)$$

В результате решения дифференциального уравнения с учетом большого сопротивления — $k^* = \sqrt{n^2 - k^2}$ и нулевых начальных условиях закон движения планшайбы запишется:

$$\varphi = e^{-nt} \times$$
$$\times\left[\frac{A}{k^2}\left(1-\frac{n}{2k^*}\right)e^{k^*t}+\frac{A}{2k^2}\left(\frac{n}{k^*}-1\right)e^{-k^*t}\right]+\frac{A}{k^2}. \quad (30)$$

Закон изменения скорости поворота планшайбы примет вид:

$$\dot{\varphi} = -ne^{-nt} \times$$
$$\times\left[\frac{A}{k^2}\left(1-\frac{n}{2k^*}\right)e^{k^*t}+\frac{A}{2k^2}\left(\frac{n}{k^*}-1\right)e^{-k^*t}\right]+$$
$$+e^{-nt}e^{-k^*t}\frac{A}{k^2}\left(1-\frac{n}{2k^*}\right)k^*- \quad (31)$$
$$-e^{-nt}e^{k^*t}\frac{A}{2k^*}\left(\frac{n}{k^*}-1\right)k^*.$$

Вывод

Обоснованы параметры и режимы работы поворота планшайбы для многошпиндельного шпильковерта.

Библиографический список

1. **Автоматизация** производственных процессов в машиностроении: учебник / Ю.З. Житников и др. под общ. ред. Ю.З. Житникова. Старый Оскол: ТНТ, 2009. 656 с.

2. **Житников Б.Ю., Житников Ю.З.** Устройства механизированной и автоматизированной сборки изделий. В 2 ч. Ковров: КГТА им. В.А. Дегтярева, 2015. 112 с.

3. **Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Маркин Д.Р.** Курс теоретической механики. В 2 т. М.: Наука, 1971. 464 с.

4. **Уплотнения** и уплотнительные кольца: справочник / Л.А. Кондаков и др. М.: Машиностроение, 1986. 464 с.

5. **Житников Ю.З., Житников Б.Ю.** Технологическая оснастка. Расчет и проектирование: учебное пособие. Старый Оскол: ТНТ, 2016. 204 с.

sb218.indd 55 06.02.2018 9:50:31

УДК 531.7:621.9

Ф.В. Гречников, *академик РАН (Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева),*
А.С. Яковишин *(Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.),*
О.В. Захаров, *д-р техн. наук (Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов)*
E-mail: zov17@mail.ru

Минимизация объема измерений плоских поверхностей деталей при сборке*

Рассмотрена методика минимизации числа измерений плоских поверхностей, основанная на моделировании методом Монте-Карло. Статистическое моделирование по результатам измерения небольшой выборки из партий деталей позволяет получать интервальные оценки погрешности измерения. Проведено сравнение четырех вариантов, отличающихся числом и расположением контрольных точек на плоскости. Выявлено, что при уменьшении числа контрольных точек уменьшается среднее арифметическое, увеличиваются стандартное отклонение ошибки измерения и вероятность измерительной ошибки второго рода. Применение предложенного подхода позволяет сократить число контрольных точек при сохранении требуемой точности измерения и тем самым повысить производительность контроля.

A technique for minimizing the number of measurements of flatness surfaces based on the Monte-Carlo simulation is considered. According to the measurement results of a small sample from the batch of parts is carried out statistical modeling, which allows you to receive interval estimates of measurement error. A comparison is made of four variants, differing in the number and arrangement of control points on the flatness. It was revealed that with a decrease in the number of control points, the arithmetic mean decreases, the standard deviation of the measurement error increases, and the probability of a second kind measurement error increases. Application of the proposed approach allows to reduce the number of control points while maintaining the required accuracy of measurement and, thus, to increase the control productivity.

Ключевые слова: измерение, плоскостность, погрешность, координатно-измерительная машина, статистическое моделирование.

Keywords: measurement, flatness, error, coordinate-measuring machine, statistical modeling.

Повышение требований к качеству сборки изделий с плоскими сопрягаемыми поверхностями обусловливает необходимость совершенствования контроля размеров и формы этих поверхностей. Для этой цели наибольшее применение получили координатно-измерительные машины (КИМ). Контроль с использованием КИМ традиционно включает в себя измерение отдельных точек на поверхностях детали, вписывание облака точек в номинальную геометрию и сравнение с допуском [1—3]. В результате принимается решение о признании детали годной к сборке или бракованной.

Оценка ошибки формы поверхности складывается из нескольких составляющих: погрешность формы после механической обработки, систематическая и случайная погрешности измерения. Систематическая погрешность измерения связана с погрешностью базирования и погрешностью дискретизации (числом контрольных точек). Случайная погрешность измерения в первую очередь зависит от погрешностей датчика касания КИМ. Повышение точности

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10204).

sb218.indd 56 02.02.2018 11:19:29

измерения требует использования большего числа контрольных точек на поверхности. Однако при этом производительность измерения существенно снижается. Поэтому возникает вопрос минимизации объема измерений.

Необходимо уменьшение размеров выборки при измерении и оценка априори возможной погрешности или неопределенности измерения [4—8]. Современные подходы к решению указанной проблемы представляют несомненную научную и практическую ценность, но касаются лишь отдельных аспектов. Поэтому на практике вопрос решается непосредственно оператором КИМ и получаемый результат во многом зависит от его квалификации. В связи с этим обоснована новая методика минимизации числа контрольных точек на плоских поверхностях, которая построена на статистическом моделировании методом Монте-Карло.

Исходная задача формулируется следующим образом: измерить заданную поверхность с определенной погрешностью и максимальной производительностью. Максимальная производительность достигается за счет, во-первых, минимизации, во-вторых, расположения контрольных точек на поверхности, обеспечивающего их наилучшую последовательность обхода. В качестве оценки погрешности измерения могут использоваться абсолютные или относительные значения плоскостности, величина брака при заданном допуске, вероятности измерительных ошибок первого и второго рода. Достоинство метода Монте-Карло заключается в получении не точечных, а интервальных оценок погрешности измерения для определенных партий деталей.

Статистическое моделирование проводят в следующей последовательности. На первом этапе моделируют последовательности псевдослучайных чисел с заданными законами распределения вероятностей и корреляцией, имитирующие случайные значения составляющих погрешностей при каждом испытании. При стабильном технологическом процессе закон распределения погрешностей не изменяется, а его параметры изменяются незначительно. Поэтому можно на основе небольшой выборки из партии деталей определить закон и параметры распределения погрешностей различных поверхностей.

На втором этапе выполняют серии расчетов для поверхностей с моделированными отклонениями формы, определяя значения погрешностей размера и формы. Число итераций при моделировании можно связать с числом деталей в партии или задать заведомо большим для статистической устойчивости.

На третьем этапе выполняют статистическую обработку результатов моделирования — устанавливают закон и определяют параметры распределения или рассчитывают статистические моменты. В результате получают интервальную оценку погрешности измерения для сравнения вариантов с различным числом и расположением контрольных точек на поверхностях [9].

Предложенный подход к минимизации объема измерений применили для контроля поверхности основания корпусной детали. Измерение выполняли на мобильной КИМ модели Faro Arm Edge (FARO Swiss Holding GmbH, Швейцария) для плоскости размера 100×100 мм с равномерным разбиением сеткой контрольных точек через 10 мм. В результате получен массив из 121 контрольной точки. Для этого в программе Power Inspect создана трехмерная модель детали с разметкой контрольных точек на измеряемой поверхности. В целях определения закона и параметров распределения измерение проводили в заданных точках 30 раз. Процедуру перебазирования выполняли 3 раза (рис. 1 на стр. 2 обложки).

Моделирование выполнено методом Монте-Карло для партий из 100 деталей. По стандартной методике ISO 12781-2:2011 рассчитано значение плоскостности. Моделирование и обработку результатов проводили с помощью разработанной программы в среде Matlab.

При моделировании рассмотрено четыре варианта расположения контрольных точек:

- вариант 1 — равномерная сетка по осям X, Y, число контрольных точек 121;
- вариант 2 — неравномерная сетка, разреженная по оси X по сравнению с вариантом 1, число контрольных точек 66;
- вариант 3 — неравномерная сетка, разреженная по оси Y по сравнению с вариантом 1, число контрольных точек 66;
- вариант 4 — равномерная сетка, разреженная по осям X, Y по сравнению с вариантом 1, число контрольных точек 36.

Вариант 1 при моделировании рассматривался как базовый. Все остальные варианты получены из базового путем исключения ряда контрольных точек по приведенному алгоритму (рис. 2 на стр. 2 обложки).

Статистическая обработка данных показала, что погрешность измерения хорошо описывается нормальным законом распределения. Оценку проводили по критерию согласия Пирсона с доверительной вероятностью 95 %.

sb218.indd 57 02.02.2018 11:19:29

Погрешности плоскостности для различных вариантов измерения

Параметры	Вариант			
	1	2	3	4
Среднее арифметическое значение, мкм	26,34	24,24	23,68	21,90
Стандартное отклонение, мкм	2,75	3,20	3,48	4,03
Количество брака, %	35	19	18	12
Измерительная ошибка, %	—	16	17	23

Сравнение вариантов проводили по среднему арифметическому значению и стандартному отклонению погрешности измерения плоскостности. Условно задан допуск на плоскостность 27 мкм и рассчитаны значения бракованных деталей в процентах и измерительные ошибки первого и второго рода. Для рассмотренных вариантов характерна только измерительная ошибка второго рода (таблица).

При использовании меньшего числа контрольных точек измеренное значение плоскостности всегда уменьшается, наибольшее расхождение с базовым вариантом 1 дает вариант 4, где среднее арифметическое меньше на 16 % и стандартное отклонение больше на 31 %.

Для всех вариантов характерна только измерительная ошибка второго рода, т.е. увеличивается вероятность считать годной по результатам измерения бракованную деталь, наибольшую ошибку дает вариант 4 с минимальным числом контрольных точек.

При измерении плоскости удовлетворительный результат дает уменьшение контрольных точек со 121 до 66, их расположение на поверхности не имеет принципиального значения (варианты 2, 3), при этом выигрыш в производительности составляет примерно 2,5 раза.

Вывод

Обоснован метод минимизации объема измерений при контроле плоских поверхностей с использованием статистического моделирования методом Монте-Карло. Моделирование на основе измерения небольшой выборки из партий деталей позволяет получать интервальные оценки погрешности измерения. При уменьшении числа контрольных точек уменьшается среднее арифметическое, увеличивается стандартное отклонение ошибки измерения и увеличивается вероятность измерительной ошибки второго рода. Применение рассмотренного подхода позволяет значительно увеличить производительность контроля при требуемой точности измерения.

Библиографический список

1. **Гречников Ф.В., Захаров О.В., Королев А.А.** Направления повышения производительности и точности контроля сложных поверхностей на координатно-измерительных машинах // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта. Москва: ИПУ РАН, 2016. С. 223—225.

2. **Печенин В.А., Болотов М.А., Рузанов Н.В., Янюкина М.В.** Оптимизация измерений геометрии деталей со сложными поверхностями // Измерительная техника. 2015. № 3. С. 18—23.

3. **Брянкин С.Ю., Лысенко В.Г., Федосов К.Ф.** Приоритетные направления метрологического обеспечения координатных методов измерений геометрических параметров деталей // 100 лет Российскому подводному флоту: тр. науч.-практ. конф. Северодвинск, 2006. С. 115—119.

4. **Васильева А.А., Абляз Т.Р.** Исследование процесса измерения корпусных деталей на координатно-измерительной машине Carl Zeiss Contura G2 // Вестник Пермского национального политехнического университета. Сер.: Машиностроение, материаловедение. 2015. № 3. С. 32—40.

5. **Джунковский А.В., Суслин В.П., Холодов Д.А.** Определение оптимального количества точек при измерении колец подшипников качения на координатно-измерительных машинах // Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров: материалы Междунар. науч.-техн. конф. М.: МАМИ, 2012. Кн. 7. С. 62—67.

6. **Raghunandan R., Rao P.V.** Selection of an optimum sample size for flatness error estimation while using coordinate measuring machine // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2007. Vol. 47. P. 477—482.

7. **Jalid A., Hariri S., Laghzale N.E.** Influence of sample size on flatness estimation and uncertainty in three-dimensional measurement // International Journal of Metrology and Quality Engineering. 2015. Vol. 6. P. 102.

8. **Ascione R., Moroni G., Petrò S., Romano D.** Adaptive inspection in coordinate metrology based on kriging models. Precision Engineering. 2013. Vol. 37. P. 44—60.

9. **Захаров О.В., Кочетков А.В.** Минимизация систематической погрешности при бесцентровом измерении круглости деталей // Метрология. 2015. № 4. С. 20—28.

sb218.indd 58 02.02.2018 11:19:29

УДК 621.71

И.А. Матвеев *(НПО "СПЛАВ", г. Тула),*
А.С. Ямников, О.А. Ямникова, *д-ра техн. наук*
(Тульский государственный университет)
E-mail: ivan_matveev@list.ru, Yamnikovas@mail.ru, yamnikovaoa@mail.ru

Влияние погрешностей базовой детали на погрешности сборки протяженных осесимметричных корпусов

Показана значимость влияния геометрической точности составного многосекционного корпуса изделия на его функционирование. Отмечена взаимосвязь параметров базовой детали и сборки, причем установлено, что превалирующее влияние имеет торцовое биение. Предложена рациональная схема базирования на окончательной обработке торцов базовой детали.

The importance of the geometrical accuracy of the composite multisection body of the product for its functioning was been shown. The relationship between the parameters of the base part and the assembly is noted, and it was been established that the end run-out prevails. A rational scheme for basing the final processing of the ends of the base part was been proposed.

Ключевые слова: функционирование, базовая деталь, погрешности детали, сборка.

Keywords: function, basic part, part errors, assembly.

Технология изготовления и сборки оказывает существенное влияние на функционирование изделий [1], поэтому особое внимание уделяют исследованию современного производства протяженных осесимметричных корпусов (рис. 1) [2, 3].

"В отличие от идеального реактивного снаряда, в реальном производстве все элементы конструкции реактивного снаряда изготавливаются с определенными допусками. В частности, переднее днище камеры сгорания реактивного двигателя, одновременно служащее стыковочным шпангоутом с боевой частью, и конус выходной соплового блока имеют наружные размеры, выполненные по квалитету h9 и h11.

В соответствии с допусками на размеры, определяющие внешний обвод реактивного снаряда, очевидно, что в окончательно собранном виде оси его отсеков могут быть относительно смещены и наклонены. При этом для реактивного снаряда с высокими удлинениями более важны угловые отклонения осей отсеков от номинального положения" [1].

Технические требования к современной базовой детали показаны на рис. 2.

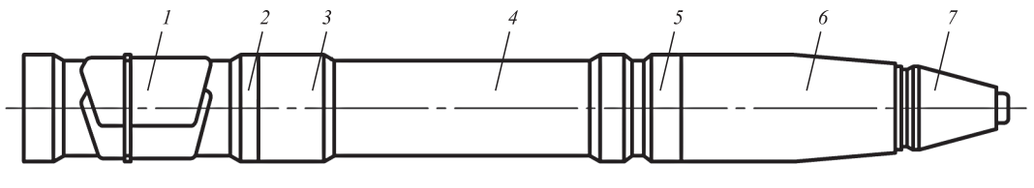

Рис. 1. Типовая компоновка реактивных снарядов калибра 122 мм:
1 — лопасти-стабилизаторы; *2* — сопловой блок; *3*, *5* — стыковочные кольца; *4* — камера сгорания; *6* — боевая часть; *7* — взрыватель

sb218.indd 59 02.02.2018 11:19:30

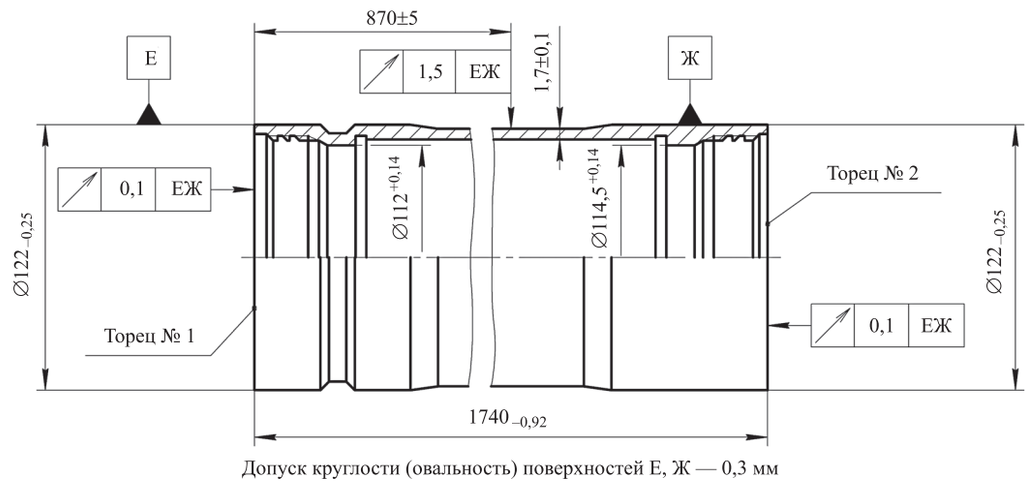

Рис. 2. Эскиз и технические требования к современной базовой детали

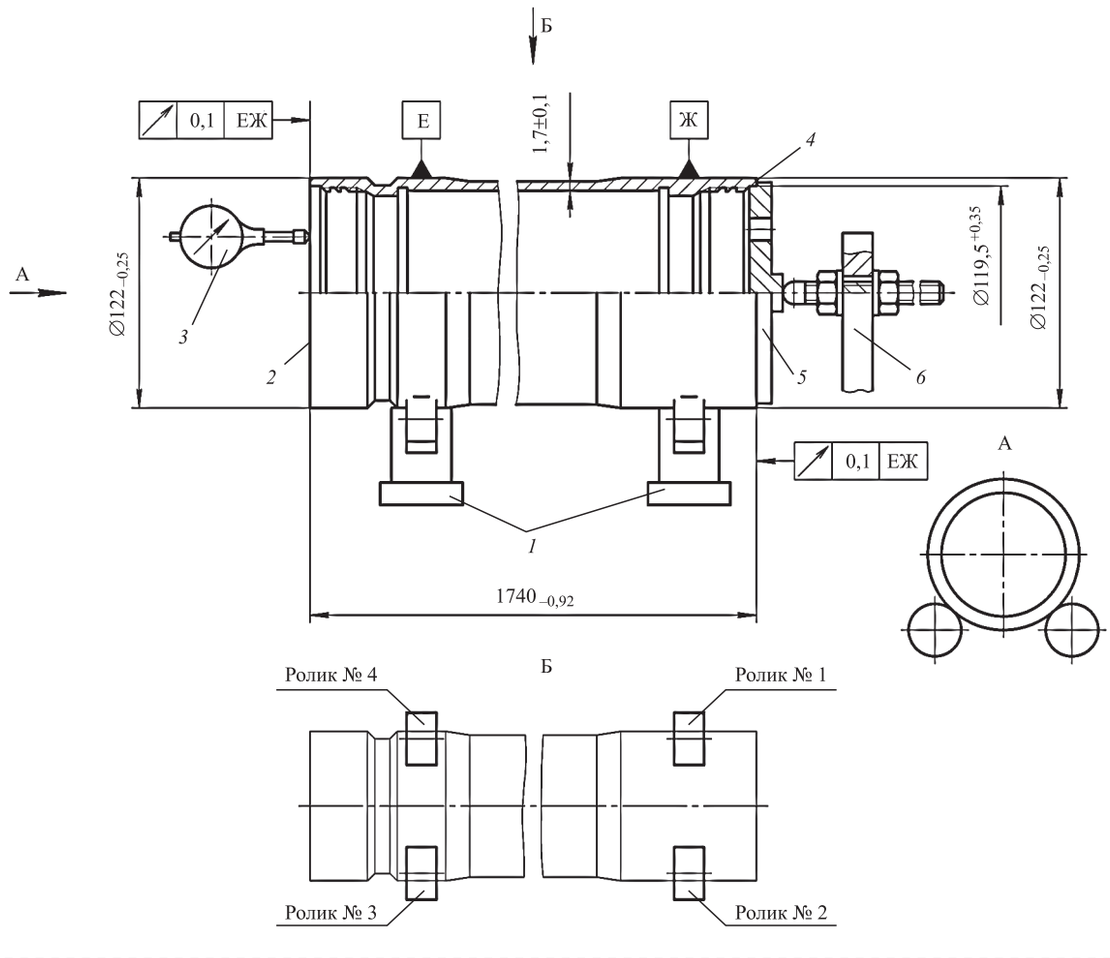

Рис. 3. Схема контроля биения торцов базовой детали:
1 — роликовые призмы; *2* — торец № 1; *3* — индикатор часового типа; *4* — торец № 2; *5* — заглушка; *6* — упор

sb218.indd 60 02.02.2018 11:19:30

Проверку радиального биения средней части базовой детали и ее торцовых биений проводят на контрольном стенде (рис. 3).

Фактические значения биения шариковых радиальных однорядных подшипников марки 6-204А с призмами в виде роликов:

Радиальное биение, мм	0,01
Торцовое биение, мм:	
ролик № 1	0,015
ролик № 2	0,015
ролик № 3	0,02
ролик № 4	0,015

Радиальное биение роликов не оказывает существенного влияния на погрешность измерения, поскольку оно более чем на порядок меньше допуска измеряемого параметра — радиального биения тела базовой детали на длине 870 мм от торца № 1.

Торцовое биение роликов не оказывает влияния на погрешности измерения, поскольку измеряемая базовая деталь с заглушкой *5* постоянно подводится до контакта с упором *6*. Для контроля торцового биения базовую деталь *2* устанавливают на роликовые призмы *1* и доводят до контакта заглушки *5* с неподвижной опорой *6* (см. рис. 3). К контролируемому торцу № 2 подводят индикатор часового типа *3* и при вращении базовой детали по разнице показаний индикатора судят о величине биения первого торца.

Для проверки биения второго торца базовую деталь поворачивают на 180° и все действия повторяют по той же схеме.

Для проверки радиального биения средней части базовой детали на том же стенде индикатор устанавливают на заданном расстоянии от первого торца и, вращая деталь, измеряют биение.

Построены экспериментальные графики распределения попадания биения в интервал и показано теоретическое распределение, параметры которого и уровень согласования рассчитаны по выборкам (рис. 4).

Сходимость теоретического и практического распределения биений подтверждена с помощью критерия Пирсона.

На рис. 5 показана схема контроля биения собранного узла с дополнительным блоком, в котором задано биение центрального отверстия. В узел включены: *4* — переходное дно; *5* — труба головная; *6* — труба хвостовая; *7* — хвостовой блок; *8* — конус задний; *9* — сопловой блок.

Узел центрирующими утолщениями А и Б устанавливают на роликовые призмы *1* и *2*, доводят до осевого упора *3*. В центральное отверстие соплового блока вводят индикатор и по колебанию его стрелки судят о величине биения.

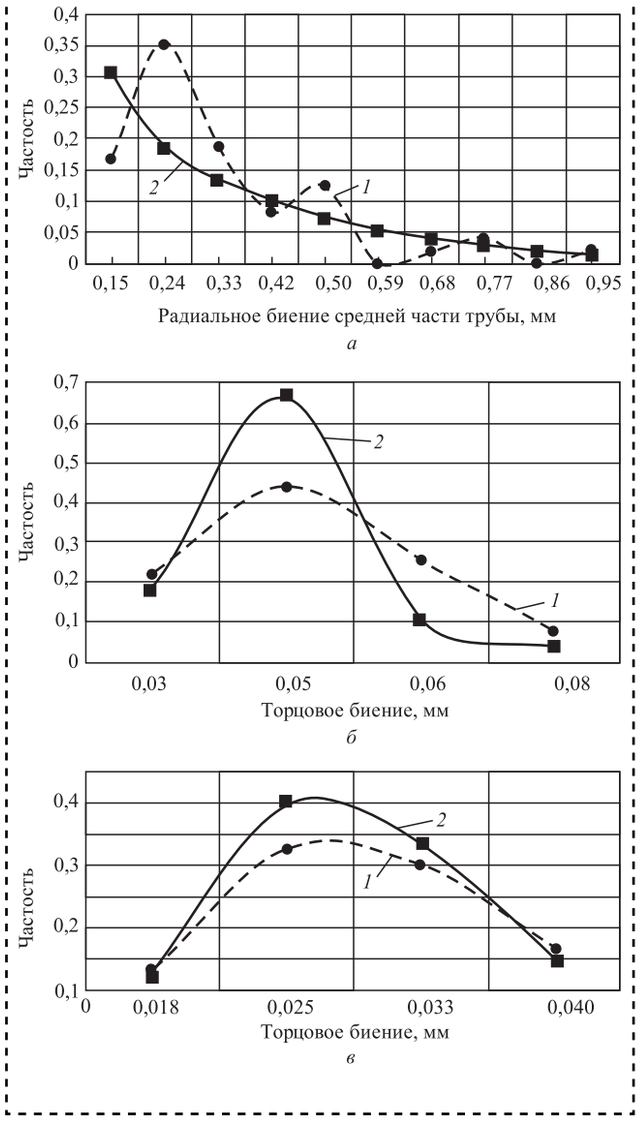

Рис. 4. Кривая распределения биения:
а — центральной части базовой детали; *б* — первого торца базовой детали; *в* — второго торца базовой детали; *1* — эксперимент; *2* — теоретический расчет

Провели замеры масс узлов, биений средней части базовой детали и биение центрального отверстия соплового блока в партии из 122 сборок. Выявлено, что торцовые биения в резьбовых замковых соединениях с упорной резьбой оказывают существенное влияние на радиальное биение удаленных от базовых поясков (центрирующих утолщений) деталей узла [4, 5].

Для выявления вида закона распределения исследуемых величин выборку разбили на 10 ин-

sb218.indd 61 02.02.2018 11:19:30

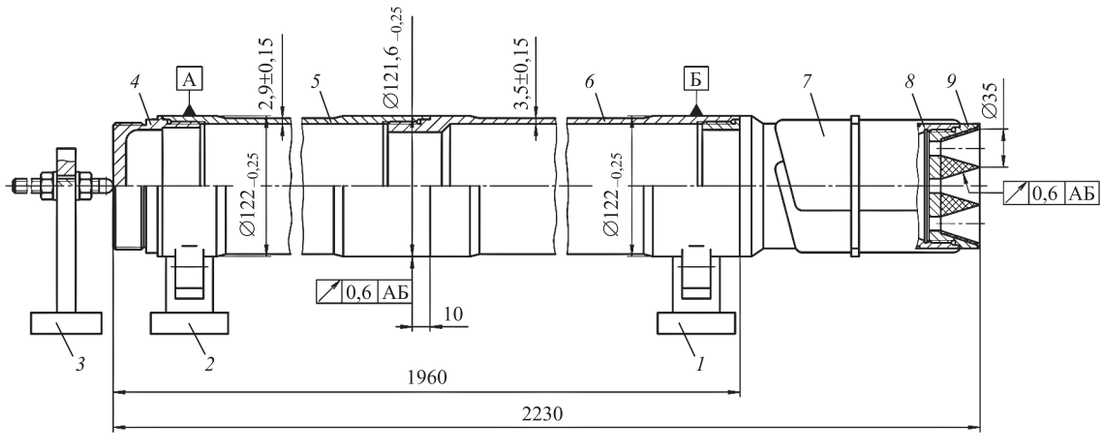

Рис. 5. Схема контроля биения центрального отверстия соплового блока в собранном узле:
1, *2* — роликовые призмы; *3* — упор; *4* — переходное дно; *5* — труба головная; *6* — труба хвостовая; *7* — хвостовой блок; *8* — конус задний; *9* — сопловой блок

тервалов, для каждого из которых посчитали частость попадания экспериментальных данных. К параметрам распределения относятся границы интервалов и частости появления значений исследуемой величины в заданном интервале.

На основе анализа экспериментальных данных получены параметры закона распределения для каждой величины и рассчитаны теоретические значения. Каждый закон был проверен с помощью критерия Пирсона.

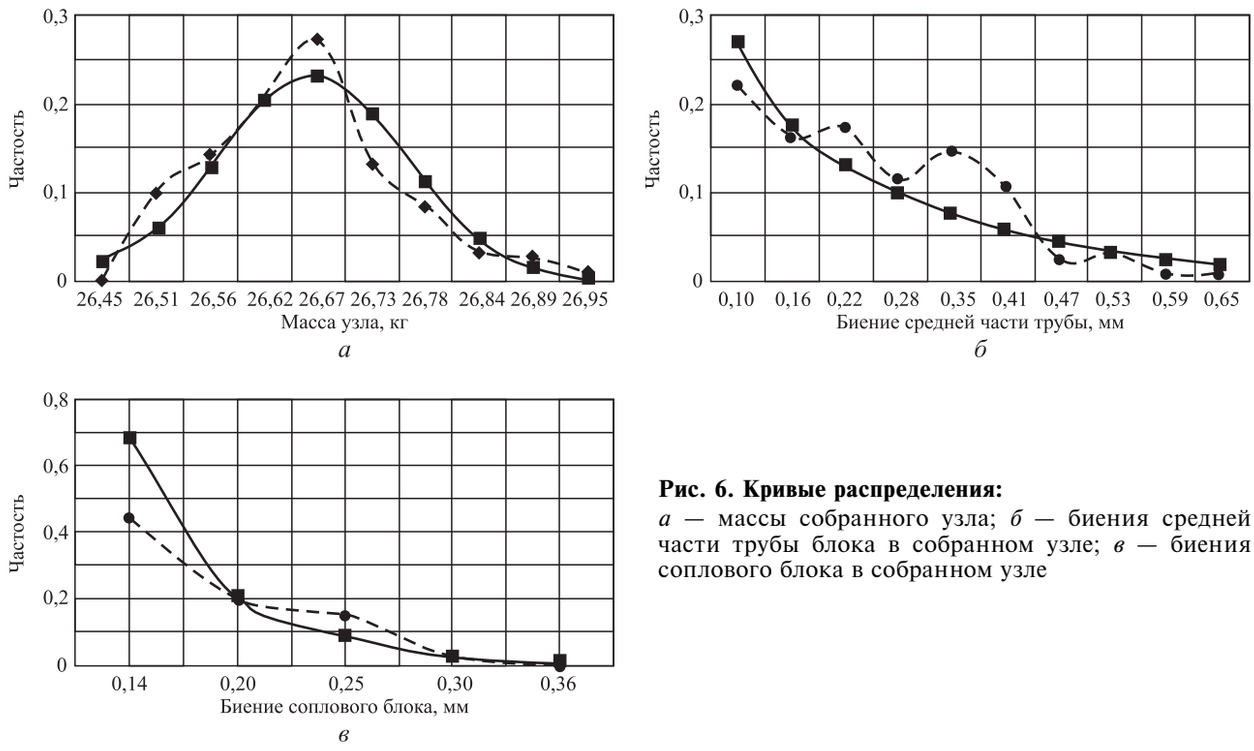

Рис. 6. Кривые распределения:
а — массы собранного узла; *б* — биения средней части трубы блока в собранном узле; *в* — биения соплового блока в собранном узле

sb218.indd 62 02.02.2018 11:19:30

Для массы узла получен нормальный закон распределения (рис. 6, *а*), для биения средней части базовой детали — показательный закон распределения (рис. 6, *б*), для биения соплового блока — закон Рэлея (рис. 6, *в*).

Сопоставление параметров распределения частости биения второго торца (см. рис. 4, *в*) и параметров распределения частости величины биения дополнительного блока (рис. 6, *в*) показывает, что они коррелируют, причем биение дополнительного блока больше, чем биение второго торца примерно во столько же раз, во сколько длина дополнительного блока больше диаметра второго торца с учетом дополнительных погрешностей из-за введения дополнительных звеньев размерных цепей [4, 5].

Для снижения биения торцов при их окончательной подрезке базирование труб длиной 1200 мм происходит следующим образом: внутри направляющей с одной стороны заготовка зажимается в цанговом зажиме с упором в торец. С противоположной стороны зажим происходит в 3-кулачковом патроне тремя секторами (рис. 7).

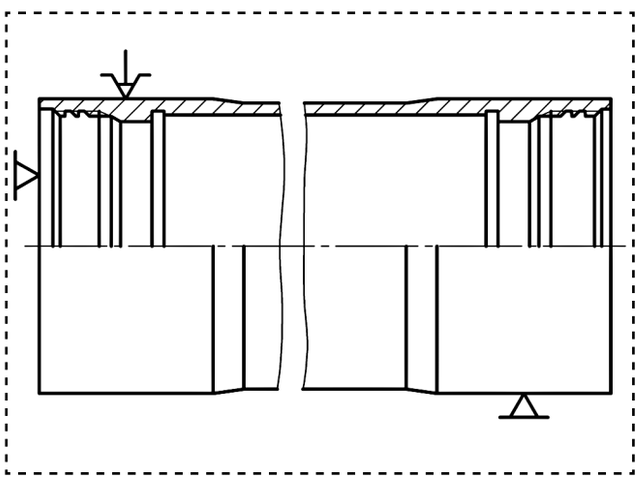

Рис. 7. Схема базирования трубы при обработке на станках с ПУ

Базирование труб длиной 1740 мм происходит по аналогичной схеме. Отличие — использование удлинителя (переходника), на который крепится цанга, и люнета, настраиваемого при наладке и служащего опорой для цангового зажима.

Выводы

Подтверждено превалирующее влияние торцового биения базовой детали на биение центрального отверстия дополнительного блока.

Предложена рациональная схема базирования заготовки базовой детали при окончательной обработке торцов на токарном станке.

Выявлены виды и вычислены параметры законов распределения основных выходных параметров сборки.

Библиографический список

1. **Редько А.А., Полторыхин С.А., Кудрявцев С.А., Косарев И.Л.** Влияние технологических отклонений при изготовлении РС РСЗО на их рассеивание при стрельбе // Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы. 2008. № 1. С. 32—35.

2. **Матвеев И.А., Ямников А.С.** Технологическая наследственность в прогрессивной технологии изготовления протяженных осесимметричных корпусов // Материалы XV ВНТК "Механики XXI веку". № 15, 2016. Братск: БрГУ. С. 119—124.

3. **Ямников А.С., Ямникова О.А., Киселев А.В.** Погрешность закрепления при консольном закреплении тонкостенной трубной заготовки, имеющей исходную овальность // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2016. № 1 (315). С. 90—96.

4. **Илюхин А.Ю., Ямников А.С.** Специфика сборки соединений с избыточными связями // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2008. № 4. С. 27—29.

5. **Матвеев И.А., Киселев А.В., Ямников А.С.** Влияние избыточных связей замковых соединений на точность автоматизированной сборки // Вестник ТулГУ. Автоматизация: проблемы, идеи, решения: сб. научных трудов МНТК "АПИР-19". Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. С. 90—93.

sb218.indd 63 02.02.2018 11:19:30

УДК 621.891

И.А. Меделяев, *д-р техн. наук (Военная академия РВСН имени Петра Великого, г. Балашиха)*
E-mail: medd_ia@mail.ru

Процессы в зоне контакта трибологических систем

Рассмотрены процессы, происходящие в зоне контакта трибологических систем. В основе этих процессов — взаимодействие поверхностей трения; изменения, происходящие в поверхностном слое материала трибосопряжений; разрушение поверхности. Эти явления взаимосвязаны, происходят одновременно и непосредственно влияют друг на друга. При их рассмотрении целесообразно учитывать энергетические параметры, характеризующие твердое тело и среду, свойства поверхности, строение поверхностных слоев. Показано проявление эффекта термогидравлической опоры в узлах трения с плоскими и параллельными опорными поверхностями.

The processes occurring in the contact zone of tribological systems. At the heart of these processes is the interaction of friction surfaces; the changes occurring in the surface layer of the material of the friction units; the destruction of the surface. These phenomena are interrelated, occur at the same time and directly affect each other. When considering them it is advisable to take into account the energy parameters characterizing the solid and the environment, surface properties, structure of the surface layers. Shows the effect of thermo-hydraulic supports in friction with flat and parallel support surfaces.

Ключевые слова: деформация, адгезия, смазочный материал, трение и изнашивание, теплота, температура, поверхностная энергия, нагрузка, скорость скольжения, термоупругая нестабильность контакта, трибомутация, наследственность, схватывание, термогидравлическая опора.

Keywords: deformation, adhesion, lubrication, friction and wear, heat, temperature, surface energy, load, sliding speed, thermoelastic instability of contact, tributary, heredity, setting, thermo-hydraulic prop.

При рассмотрении многофакторных процессов, происходящих при трении и изнашивании деталей машин в трибологических системах, целесообразно учитывать энергетические параметры, характеризующие твердое тело и среду, свойства поверхности, строение поверхностных слоев и т.д.

Для удобства анализа процессов, происходящих в зоне трения, выделим три явления: взаимодействие поверхностей трения; изменения, происходящие в поверхностном слое материала твердых тел; разрушение поверхности. Эти явления взаимосвязаны, происходят одновременно и непосредственно влияют друг на друга.

Взаимодействие поверхностей трения и изменения в поверхностном слое материала твердых тел

Процессы механического и молекулярного взаимодействия обычно происходят одновременно. Они постоянно оказывают взаимное влияние друг на друга в процессе трения. В зависимости от сочетания внешних факторов (нагрузки и скорости скольжения, окружающей среды, смазочного материала, геометрии и физико-механических свойств поверхности твердых тел) влияние каждого из них в отдельности на процессы трения и изнашивания может быть различным, а сочетание их характеризует трибологическую систему в целом и определяет как возможные изменения в поверхностном слое материала в процессе трения, так и механизм разрушения поверхности.

В результате взаимодействия неровностей поверхности реальных твердых тел в точках фактического их соприкосновения при относительно небольших нагрузках возникает большое давление, которое может превышать предел текучести материала, что приводит к упругой и пластической деформации. Пластическая деформация связана с преобразованием части энергии в тепловую, чем и объясняется разогрев поверхностей тел при трении.

При внешнем трении, которое является основной причиной разрушения поверхности, происходит трансформация механической работы по преодолению сил трения в энергию внутренних процессов.

sb218.indd 64 02.02.2018 11:19:30

Работа внешнего трения $A = Q + \Delta E$ расходуется на образование теплоты и энергии, поглощаемой поверхностью трения ΔE [1], которая расходуется на смятие неровностей и пластическую деформацию поверхностных слоев. Деформация — следствие сопротивления твердого тела действию внешних сил. Она приводит к изменению площади фактического контакта, геометрии поверхности, структуры и свойств материала, коэффициента трения (рис. 1).

При трении деформация развивается в микрообъемах поверхностного слоя, в которых имеет место непосредственный контакт с контртелом. В связи с дискретностью контакта это происходит не одновременно и зависит от степени дискретности, нагрузки, скорости скольжения и ряда других факторов. В каждом микрообъеме в период контакта циклически изменяется знак возникающих напряжений. Контакт поверхностей и их взаимодействие приводят к образованию поверхностных связей, их деформации и разрушению.

Отличительная особенность деформации в результате трения — она является следствием одновременного действия нормальных и тангенциальных сил. Главная роль принадлежит тангенциальному напряжению, что обусловливает направленное течение поверхностных объемов материала.

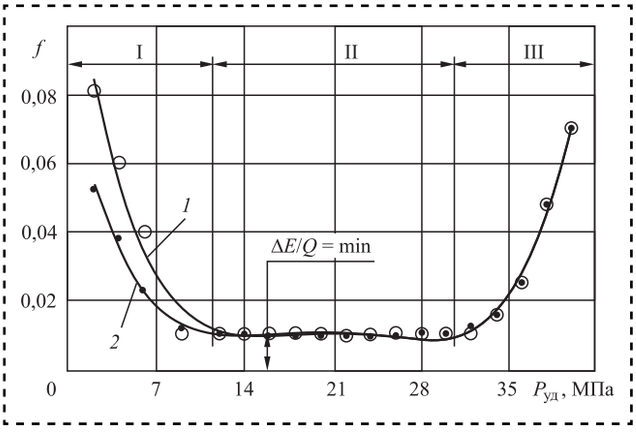

Рис. 1. Изменение коэффициента *f* трения в зависимости от удельной нагрузки $P_{уд}$ при температуре смазочного материала на входе в узел трения T_f = 20 (*1*) и 100 °С (*2*), v = const:

I — область неустойчивых процессов (область пуска и приработки, формирования тепловой флуктуации в объеме трения); II — область нормального трения (область совместимости и упругой деформации); III — область повреждаемости при высоких температурах ("срыв" смазочной пленки, износ и схватывание, проявление пластической деформации); ΔE — изменение внутренней энергии, складывающейся из энергии, идущей на изменение структуры материала ΔE_e и энергии нагрева ΔE_v ($\Delta E = \Delta E_e + \Delta E_v$); Q — энергия теплообмена со средой

Процесс внешнего трения в соответствии с молекулярно-механической теорией представляет собой деформирование тонких поверхностных слоев трущихся тел, которое сопровождается разрушением адгезионных связей между пленками, покрывающими эти тела.

Разрушение структуры — заключительный этап пластической деформации.

Химическое воздействие среды на трибологическую систему связано с образованием пленок (оксидных и смазочных), изменяющих энергию поверхностного слоя и оказывающих решающее влияние на формирование механизма изнашивания.

Процесс трансформации энергии при трении в трибосистеме можно разделить на три фазы: образование реальной площади контакта; формирование некоторого энергетического поля вследствие протекания упругопластической деформации и адгезии; распределение энергии между элементами трибосистемы. Выделяющаяся в процессе трения энергия может рассеиваться или частично накапливаться в поверхностных слоях трибосопряжения. Поглощаемая материалом поверхностного слоя энергия составляет небольшую долю (в пределах нескольких процентов) и расходуется как на образование точечных дефектов и дислокаций, так и на образование новых поверхностей раздела.

Диссипация (рассеивание) энергии обусловлена излучением и теплообразованием при трении. Основная часть рассеиваемой при трении энергии переходит в теплоту. Теплообразование при трении — вторичный процесс, сопровождающий некоторые явления упругопластической деформации. Микроконтакты, образующиеся и разрушающиеся в процессе скольжения, вызывают искажения и вибрации кристаллической решетки, что является причиной выделения теплоты. Выделяющаяся при трении теплота может либо оставаться внутри системы (действуя как энергия активации диффузионных процессов, химических реакций, изменения физических свойств материала), либо покидать систему путем конвекции, проводимости или излучения. Интенсивность тепловых потоков зависит от работы трения и площади, на которой она генерируется.

Трибологические процессы в зоне контакта твердых тел при их относительном перемещении существенно зависят от вида смазки — гидродинамической, смешанной или граничной.

Из зависимости Герси—Штрибека (рис. 2), которая связывает коэффициент трения с параметрами процесса смазывания (вязкостью, скоростью, нагрузкой), следует, что при смешанном смазывании (гидродинамическое и граничное смазывание, см. рис. 2, зона II) расстояние между сопрягаемыми поверхностями соизмеримо с параметрами их шероховатости.

sb218.indd 65 02.02.2018 11:19:30

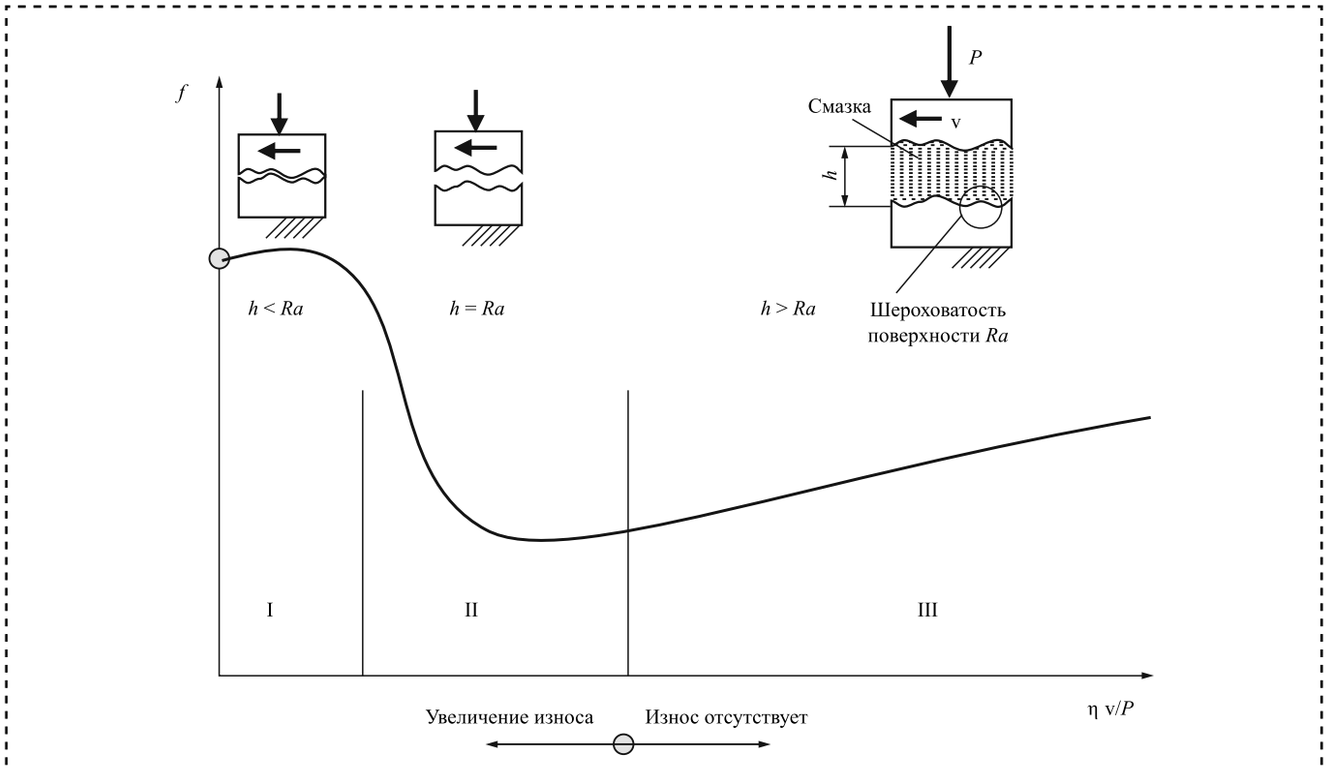

Рис. 2. Диаграмма Герси—Штрибека

При граничном смазывании (см. рис. 2, зона I) сопрягаемые поверхности контактируют на некотором участке. Толщина слоя смазочного материала значительно меньше параметров шероховатости поверхностей. Процесс трения обусловлен свойствами смазочного материала, которые отличаются от свойств материала в большом объеме (далее объемные свойства). Изнашивание поверхностей определяется физико-химическими взаимодействиями в "пятнах" фактического контакта поверхностей, параметрами поверхностей и свойствами граничных слоев смазочного материала. В результате физико-химических процессов на поверхностях трения образуются граничные слои, которые исключают непосредственный контакт неровностей. Они отличаются низкой прочностью на сдвиг и большим сопротивлением сжатию. Тонкая граничная пленка смазочного материала на сопрягаемых поверхностях повторяет их рельеф, контакт поверхностей происходит через смазочный материал по отдельным участкам. Малая толщина смазочного слоя не может препятствовать упругой и пластической деформациям контактирующих тел, при этом сдвиг происходит в пленке, а не в основном материале. При значительной пластической деформации и высокой температуре смазочная пленка может разрушиться, тогда адгезия, трение и изнашивание увеличиваются.

При граничном смазывании процесс трения обусловливают триады И.В. Крагельского и А.В. Чичинадзе, эффект П.А. Ребиндера. С учетом различий свойств поверхности твердого тела и граничного слоя смазочного материала процесс трения определяется взаимодействием смазочного слоя с твердым телом и молекулярно-механическими свойствами этого слоя.

При гидродинамическом смазывании (см. рис. 2, зона III) сопрягаемые поверхности полностью разделены слоем смазочного материала. Толщина h слоя значительно больше параметра Ra шероховатости поверхности. Трение определяется вязкостными свойствами смазочного материала; изнашивание поверхностей отсутствует.

При смешанном смазывании процесс трения неустойчив и при повышении нагрузки переходит в трение с граничным смазыванием. Поэтому целесообразно рассматривать работу узлов трения при смешанном смазывании двух типов: 1) трение при гидродинамическом и граничном смазывании; 2) трение при граничном смазывании и без смазочного материала (сухое трение).

Разделение процесса смешанного смазывания на два вида позволяет описать работу узлов трения, соответствующую на графике Герси—Штрибека зоне, находящейся слева от минимума. В этом случае граничное смазывание — основой вид трения.

sb218.indd 66 02.02.2018 11:19:30

В процессе эксплуатации поверхностные слои узлов трения и смазочный материал испытывают динамические воздействия, приводящие к упругопластическим деформациям, выделению теплоты, нарушению динамического равновесия процессов разрушения и восстановления смазочной пленки на поверхностях трения, к повреждению поверхностей пары трения [1—5].

Средняя температура в смазочной пленке на контурной площади контакта (КПК — площадь, на которой реализуется дискретный контакт микронеровностей, обусловленный совокупностью пятен контакта, которые в результате волнистости поверхностей тел группируются на вершинах волн в отдельных зонах и изменяют свое положение в процессе трения) зависит от прочности пленки на сдвиг, скорости относительного перемещения сопрягаемых тел и теплоотвода из зоны контакта. При этом температура увеличивается при повышении первых двух факторов и снижении последнего.

Выделяемая тепловая энергия приводит к термическому нагружению материалов пары трения и смазочного материала, что изменяет их работу и сокращает срок службы. Результат тепловой нагрузки — повышение температуры трения, причем в различных местах сопряжения по-разному.

Термоупругая нестабильность контакта

Воздействие теплоты на пару трения приводит к нарушению термоупругой стабильности контакта (макроконтакта). Неравномерное нагревание по толщине обусловливает тепловые деформации пары трения: выпучивание отдельных участков сопрягаемых поверхностей. Контакт происходит по отдельным вершинам неровностей, несмотря на то, что в исходном (приработанном) состоянии контактирующие поверхности были плоскими. Имеет место неидеальный тепловой контакт, обусловленный неодинаковыми температурами тел, что влияет на распределение тепловой энергии между ними. Это приводит к термоупругим перемещениям участков поверхностей контакта, изменению зон взаимодействия и перераспределению контактных напряжений, структур тел, их физико-механических свойств, физико-химических процессов на контактных поверхностях, а также к изменениям коэффициента трения и процесса изнашивания [1, 6, 7].

Ввиду условий устойчивости для пары трения на движущейся поверхности образуются как минимум три участка с высокими температурами, что вызывает ползучесть материала и постепенное перемещение этих участков. Образуется термоупругая волна, ось которой совпадает с вектором скорости относительного движения взаимодействующих тел. Вследствие ползучести материала происходит разрушение более нагретых участков, и волна в результате выпучивания материала перемещается на менее нагретый участок. Равновесие процесса обеспечивается термоупругими свойствами материала. Трение происходит непосредственно на перемещающейся волне. При этом в контакт вступают менее нагретые участки волны. Волна перемещается от более нагретых участков к менее нагретым.

При снятии нагрузки зона трения охлаждается и "проваливается". При последующем нагружении пары трения новый участок контакта образуется рядом со старым и т.д. При цикличном нагружении имеет место цикличное возникновение контакта. Контактный участок перемещается до тех пор, пока не охватит всю поверхность трения. При этом происходит подготовка поверхности к восприятию более высоких нагрузок.

Синусоидальные изменения коэффициента трения и температуры дают основание полагать, что аналогичные изменения происходят и с нагрузкой, и с удельным тепловым потоком на поверхностях трения.

При разных материалах тел пары трения (например, бронза и сталь) термическое возмущение, включающее флуктуации давления и температуры, движется вдоль поверхности взаимодействия со скоростью, отличной от скоростей их распространения вдоль поверхностей каждого тела в отдельности. Существенная разница теплопроводности материалов ведет к возмущению, сконцентрированному в теле с более высокой теплопроводностью. Именно в это тело направляется основная часть теплоты. Увеличение разницы температур тел трения вызывает рост относительной кривизны двух поверхностей и уменьшение зоны контакта. То есть одна из поверхностей пары трения проводит меньше теплоты, что уменьшает термоупругую деформацию поверхности сопрягаемого тела с большей проводимостью и повышает предельные значения удельной нагрузки и скорости скольжения. Повышение удельной нагрузки до предельного значения приводит к повышению температуры в пятне контакта и реализации режима схватывания.

Незначительные различия температур поверхности трения и смазочного материала в узле трения дают основание считать, что в связи с проявлением термоупругой нестабильности контакта решающее влияние на трение пары "сталь—бронза" при граничном смазывании оказывает температура вспышки на фактических пятнах контакта [1, 5, 8].

Интенсивность температурных вспышек в зоне контакта тел зависит от степени шероховатости поверхностей трения. Реальные тепловые нагрузки имеют ясно выраженный пиковый характер,

sb218.indd 67 02.02.2018 11:19:31

неоднородны по площади контакта и на 20...30 % оказываются выше температур, рассчитанных для идеальных гладких поверхностей контакта.

Работа сил трения в парах трения со смазочным материалом зависит от прочности смазочной пленки на сдвиг. При этом подводимая в пару трения энергия затрачивается на внутреннее трение, деформацию материала пленки и тонких поверхностных слоев материалов двух тел в паре. Тепловой эффект при трении практически эквивалентен работе сил трения. В силу дискретности термоупругого контакта дискретно и температурное поле на поверхностях взаимодействия двух тел в паре.

Поля фрикционного взаимодействия и температурное на поверхности контакта двух тел — как граничные — представляют собой единое физическое поле, которое описывает два взаимосвязанных эффекта дискретности: фрикционный и температурный. Первично при этом поле фрикционного взаимодействия.

На поверхностях контакта двух тел в паре со смазочным материалом образуется термоупругая волна (термоупругое выпучивание материала поверхностей трения), продольная ось которой ориентирована вдоль вектора скорости относительного перемещения двух тел в паре. Термоупругий эффект выпучивания приводит к возникновению контурного контакта (контурных площадей) двух тел в паре трения и осуществлению трения и изнашивания на этом контакте; выделяются зоны контурного трения и зоны охлаждения.

Схватывание

Для каждой совокупности эксплуатационных условий, обусловливающих работу трибосопряжения наблюдаются предельные значения толщины смазочного слоя, критерия $P_{пр}v$ (где $P_{пр}$ — предельная нагрузка), температуры поверхности трения и смазочного материала, превышение которых приводит к схватыванию и износу материалов сопряжения (см. рис. 1, область III). Развитие процесса схватывания во времени включает несколько стадий [5]:

сближение атомов контактирующих металлов за счет пластической деформации;

разрушение смазочной пленки и образование активных центров на поверхности более твердого металла;

объемное взаимодействие.

Технологическая наследственность

Установлена технологическая наследственность на режимы нагружения (распределенной нагрузки P и скорости v скольжения) и смазочный материал, проявляемая в адгезии смазочной пленки на контактных поверхностях, которая зависит от температуры смазочного материала и микрогеометрии поверхностей, а трение и изнашивание — это единый физический процесс, обусловленный внешнесиловым воздействием на пару трения [1, 9, 10].

Изменение распределенной нагрузки P в паре трения или скорости v скольжения приводит к замене одних хемосорбционных пленок другими и ускоряет образование этих пленок, т.е. происходит регулирование фрикционным тепловыделением, тем самым поддерживая динамическое равновесие между разрушением и восстановлением хемосорбционных пленок на поверхностях пары трения. Интенсивность смазочного эффекта данных пленок зависит от внешнесилового воздействия.

С повышением нагрузки увеличивается деформация контактирующих микрообластей, что обусловливает увеличение площади фактического контакта в паре трения. Ускорение скольжения увеличивает число единичных контактов в единицу времени, адгезию и адгезионный перенос. При этом увеличение нагрузки или скорости скольжения сопровождается увеличением температуры поверхностей трения и повышением скорости образования хемосорбционных пленок на поверхностях трения.

Изменяя режимные параметры P и v, можно влиять на образование хемосорбционных пленок из смазочного материала и управление этим процессом путем циклического внешнесилового воздействия на пару трения. Циклическое силовое воздействие в паре трения снижает коэффициент трения, расширяя область нормального трения, и обеспечивает минимальное сопротивление сдвигу в паре трения [1—4]. В зоне контакта пары трения изменяется физическое состояние смазочной пленки, которая приобретает свойства квазиупругого твердого тела с низким сопротивлением сдвигу [1, 8, 11].

Для предотвращения срыва смазочной пленки с поверхности контакта необходимо обеспечить определенный запас прочности, который создается обкаткой. Поверхности, прошедшие термохимическую и диффузионную обработку, обладают наследственностью, которая передается поверхностям контакта. Имеет место динамическая равновесность поверхностей. Таким образом, пары трения при эксплуатации обладают свойствами, которые закладываются при обкатке, в частности, способностью приклеивания смазочной пленки. При этом кинетика химических реакций между поверхностями трения и смазочным материалом зависит от таких факторов, как высокая распределенная нагрузка на пятно контакта, относительное перемещение поверхностей пары трения (скорость скольжения), неравномерность энергетического состояния контактных поверхностей.

Изменения фрикционного тепловыделения при высоких нагрузках и постоянной скорости

sb218.indd 68 02.02.2018 11:19:31

скольжения путем цикличного нагружения пары трения, снижая и увеличивая распределенную нагрузку, при заданной скорости скольжения приводят к возникновению пятен контакта на новых участках поверхности. При циклическом нагружении вся поверхность трения подвергается деформации и подготавливается к восприятию более высоких нагрузок. Предельные нагрузки выше примерно на 30...40 %, чем при изменении нагрузки и постоянной скорости скольжения. Поверхность трения приобретает наследственность относительно режимов нагружения.

Физико-химические процессы и образование смазочной пленки на поверхностях трения в большей степени зависят от температуры смазочного материала, чем от нагружения [12].

Механическое нагружение контактирующих поверхностей — причина адгезии (образования поверхностных связей), пластической деформации (сдвигового процесса), возникновения и увеличения температуры поверхности трения и теплового потока, т.е. генерируется фрикционная теплота — бóльшая часть работы трения преобразуется в теплоту, остальная часть расходуется на изменение внутренней энергии поверхностных слоев и химическое взаимодействие смазочного материала с поверхностями пары трения.

Фрикционная теплота обусловливает физико-химические процессы на поверхностях контакта, интенсивность которых зависит от температуры поверхностей трения и теплового потока, определяемых режимом нагружения v и P и температурой T_f смазочного материала.

В соответствии с законом Аррениуса тепловая энергия активизирует диффузию, адсорбцию и химические взаимодействия смазочного материала с контактными поверхностями — на них создаются защитные смазочные пленки, скорость образования которых зависит от интенсивности теплового воздействия. При этом определяющим является химическое взаимодействие.

При повышении температуры вязкость смазочного материала снижается, повышается его диффузия в дефектах кристаллической структуры, проходит их пропитка и заполнение смазочным материалом. Фрикционная теплота дополнительно повышает образование смазочной пленки.

Повышение температуры смазочного материала на входе в узел трения снижает коэффициент трения, износ, сопротивление сдвигу и обеспечивает "мягкий" режим пуска для пары трения. Работоспособность машины обеспечивается созданием прочной смазочной пленки на поверхностях трения, причем ее следует создавать до нагружения в течение некоторого времени при повышенной температуре смазочного материала и только затем следует нагружение [12, 13].

Эксперименты показали, что детали трения машин, прошедшие обкатку по предлагаемой схеме, приобретают свойства наследственности, т.е. память к режимам нагружения и используемому смазочном материалу.

В процессе приработки исходная шероховатость контактирующих поверхностей изменяется до эксплуатационной. Если эксплуатационная шероховатость достигается механической обработкой, то обеспечивается оптимальное значение критерия $P_{\text{пр}}$v и время приработки сокращается, а поверхностям контакта придается технологическая наследственность по оптимальным эксплуатационным микрогеометрическим характеристикам.

Таким образом, технологическую наследственность применительно к поверхностному слою следует рассматривать не только относительно механики и химико-технологической термообработки, но и вида и состояния смазочного материала, влияющих на образование смазочных пленок на контактных поверхностях, режим нагружения при обкатке машин, что указывает на целесообразность разработки рациональных технологических схем нагружения машин.

Технологическая наследственность должна состоять в приведении эксплуатационных качеств деталей (микрогеометрии, физико-механических свойств) технологическими методами в самом процессе изготовления деталей и последующей обкатке машин при повышенной температуре смазочного материала вначале обкатки для создания смазочной пленки на поверхностях трибосопряжений перед их механическим нагружением [10].

Изнашивание пар трения

При смешанной смазке это сложный физический процесс, зависящий от механического взаимодействия трущихся поверхностей, возникающего теплового воздействия, химического взаимодействия смазочного материала с поверхностями, а также геометрии контакта (характером и формой контактной площади сопряженных пар, их сближением) и физических свойств материалов трения и смазочной среды. Поэтому процесс трения и изнашивания следует расценивать как единый физический процесс, обусловленный внешнесиловым воздействием на материалы трения.

Для рассматриваемого случая необходимо учитывать:

1. Контакт дискретен и осуществляется контурными площадями, которые группируются вокруг среднего диаметра и периодически изменяют свое положение в зависимости от циклического нагружения.

2. Процесс механического взаимодействия на контакте нестационарный и характеризуется переменными факторами: силой трения, степенью упругой и пластической деформации, скоростью изнашивания. Эти переменные взаимосвязаны и

sb218.indd 69 02.02.2018 11:19:31

зависят от нестационарных процессов теплового воздействия и влияния смазочного материала.

3. Тонкая структура поверхностных слоев формируется в результате сложного механического, теплового и химического воздействия смазочного материала и определяет качественные закономерности процесса и его количественные параметры.

К факторам, влияющим на процесс трения и изнашивания, следует отнести:

— физическую и химическую сущность процесса;

— адгезионное изнашивание, возникающее при пуске узлов трения (в начале процесса трения) и в области высоких температур и удельных нагрузок;

— взаимодействие материалов трибосистемы и проявляющееся при этом изменение свойств материалов вследствие контактного взаимодействия и изнашивания при трении, связанное с перемещением молекул смазочного материала в поверхностном слое металлов под влиянием силовых и тепловых воздействий, приводит к явлению трибомутации [14].

Трибомутация

Суть этого явления состоит в том, что до начала механического нагружения на поверхностях трения нужно создать смазочную пленку, используя теплоту смазочного материала (жидкости) и активизируя физико-химические процессы на поверхностях контакта, а затем следует этап механического нагружения.

Теплота, которой обладает смазочный материал, способствует снижению его вязкости и усилению диффузии по дефектам кристаллической структуры твердых тел, поскольку коэффициент диффузии и вязкость обратно пропорциональны друг другу. В соответствии с законом Аррениуса ускоряются физико-химические процессы и повышается адгезия смазочных пленок на поверхностях трения в результате эффективной реализации межатомных связей и обеспечения минимума свободной энергии на поверхностях металлов и смазочного материала. Дополнительный вклад в образование смазочной пленки вносит фрикционная теплота.

Физико-химические процессы

При изменении нагрузки на пару трения или скорости скольжения одни хемосорбционные пленки заменяются другими в результате срыва и образования новых пленок, а также регулирования фрикционного тепловыделения, что поддерживает равновесное состояние контактных поверхностей.

С повышением нагрузки увеличивается деформация микропрофилей пары трения и площадь фактического контакта. Увеличение скорости скольжения приводит к увеличению единичных контактов в единицу времени, адгезии и адгезионного переноса. В свою очередь увеличение нагрузки или скорости скольжения сопровождается повышением температуры поверхностей трения и скорости образования пленок.

В результате изменения нагрузочно-скоростных параметров (нагрузки и скорости скольжения) и предварительного нагрева смазочного материала определяющее влияние на изнашивание узлов трения и создание смазочных пленок на поверхностях контакта оказывают адгезия, пластическая и упругая деформации, диффузия, адсорбция, химическое взаимодействие смазочного материала с поверхностями контакта [1, 4, 6, 7], а также технологическая наследственность (эффект памяти) трибосопряжений по нагрузочно-скоростным параметрам и смазочным материалам [9, 10].

Для снижения изнашивания трибосопряжений (деформационной и адгезионной составляющих силы трения) необходимо обеспечение минимального сопротивления сдвигу и уменьшение деформационной составляющей за счет эффекта технологической наследственности. Эти условия наиболее эффективно осуществляются для твердых тел, на поверхности которых существует смазочная пленка или поверхностный слой пониженной прочности на сдвиг.

Значительное влияние на деформацию тонкого поверхностного слоя оказывает активное взаимодействие полярных молекул смазочного материала с поверхностями твердого тела, приводящее к адсорбционному понижению прочности твердых тел (эффект П.А. Ребиндера). Существенным оказывается как внешний адсорбционный эффект, приводящий к пластифицированию поверхностного слоя, так и внутренний, связанный с миграцией поверхностно-активных веществ (ПАВ) в зародышевые трещины путем поверхностной диффузии по дефектам решетки, возрастающей с повышением температуры смазочного материала на входе в узел трения. Внешний адсорбционный эффект обусловлен облегчением выхода дислокаций на поверхность деформируемых металлов в результате снижения поверхностной энергии из-за адсорбции ПАВ. Внутренний адсорбционный эффект приводит к понижению поверхностной энергии и потере прочности. Эффект адсорбционного понижения прочности влияет на адгезионную составляющую силы трения и износостойкость поверхностного слоя.

Поверхностные явления вызываются избытком свободной энергии в пограничном слое — поверхностной энергией, повышенной активностью и ориентацией молекул поверхностного слоя, особенностями его структуры и состава. Химические

sb218.indd 70 02.02.2018 11:19:31

и физические взаимодействия твердых тел и смазочного материала происходят в поверхностных слоях. Основные поверхностные явления связаны с уменьшением поверхностной энергии, пропорциональной площади поверхности. Повышение температуры приводит также к уменьшению поверхностной энергии, быстрота этого уменьшения обратно пропорциональна абсолютной температуре.

При соприкосновении смазочного материала и твердого тела возникают капиллярные явления, обусловленные действием межфазной поверхностной энергии на границе раздела несмешивающихся фаз и влиянием смачивания при взаимодействии молекул смазочного материала и твердого тела, вызывающие искривление поверхностей раздела. Разница капиллярного давления, возникающая в результате различной кривизны поверхностей менисков, приводит к капиллярному передвижению смазочного материала по дефектам решетки к мениску с меньшим радиусом кривизны, т.е. в сторону меньшего давления.

Причиной передвижения смазочного материала по дефектам решетки может быть не только градиент кривизны поверхностей менисков, но и градиент поверхностной энергии смазочного материала. Градиент температуры приводит к разности поверхностной энергии и, следовательно, к разности капиллярного давления в смазочном материале (термокапиллярное течение). Аналогичный эффект наблюдается при уменьшении поверхностной энергии при адсорбции ПАВ, которые снижают поверхностную энергию и смазочный материал перемещается в том направлении, где адсорбция ПАВ на поверхности меньше (эффект Марангони—Гиббса).

Для оценки влияния адсорбции смазочного материала на изменение поверхностной энергии и на антифрикционные свойства сочетания материал поверхности трения—смазочный материал выполнены эксперименты по измерению работы выхода электрона (РВЭ) методом контактной разности потенциалов (КРП) (таблица). РВЭ — наиболее чувствительный параметр энергетического состояния поверхностных слоев, который содержательно описывает изменение поверхностной энергии [15].

Имеет место существенное снижение КРП (т.е. повышение работы выхода электрона) из-за окисления. Наиболее заметно снижается КРП для бронзы БрОСН10-2-3, что связано с большей активностью поверхности бронзы БрОСН10-2-3 по сравнению с БрО12 и БрАЖ9-4. Чем больше смазочный материал меняет работу выхода электрона, тем выше антифрикционные сочетания материал поверхности трения—смазочный материал [16]. Отсюда следует, что энергетическое состояние поверхностей контакта и смазочного материала в значительной мере влияет на образование смазочных пленок на поверхностях контакта и антифрикционные свойства деталей машин.

Физико-химические свойства смазочного материала во многом определяют величину сопротивления сдвигу. Для предотвращения срыва смазочной пленки с поверхностей пары трения используют обкатку, которая, как правило, заключается в механическом нагружении пары трения, в результате чего генерируется фрикционная теплота, ускоряющая физико-химические процессы. При этом теплота смазочного материала в этом процессе не участвует.

При нормальной температуре 20...25 °С смазочный материал поглощает часть фрикционной теплоты, что снижает скорость образования смазочных пленок на поверхностях контакта. Это приводит к срывам смазочных пленок с поверхностей трения, обладающих меньшей адгезионной прочностью относительно контактных поверхностей.

Для повышения адгезионной прочности смазочную пленку на поверхностях трения следует создать до механического нагружения. Повысить адгезию смазочного материала и поверхностей трения можно увеличивая температуру смазочного материала узла трения до 60...80 °С, выдержав его в этом температурном режиме некоторое время, и только после этого выполнить его приработку, осуществив механическое нагружение. Повышенная температура смазочного материала предотвращает попадание влаги и воздуха в узел трения, которые вызывают их водородное изнашивание.

Исследования прочности смазочной пленки на сдвиг в зависимости от режимов приработки и шероховатости поверхностей пары трения показали целесообразность комплексной термохимической обработки (обкатки) поверхностей пары трения путем механического нагружения.

Эффект термогидравлической опоры

При скоростях 1...2 м/с пары трения скольжения (блок цилиндров—распределительный золотник, башмак—наклонная шайба, торцевые уплотнения) гидравлических машин сохраняют параллельность сопряженных поверхностей контакта и клиновидный зазор между поверхностями трения не образуется [1].

Данная особенность в работе пар трения обусловлена:

а) отсутствием сил инерции и действия периодической возмущающей силы и отслеживанием сопряженной поверхностью контакта торцевого биения вращающейся детали с минимальным фазовым запаздыванием [1];

б) образованием в смазочном слое между плоскопараллельными поверхностями контакта термического (плоскостного) клина, возникающего при нагревании смазочного материала за счет трения [1, 6—8].

В смазочном зазоре между поверхностями трения при перемещении одной поверхности от-

sb218.indd 71 02.02.2018 11:19:31

Изменение КРП для антифрикционных сплавов после выдержки в смазочном материале АМГ-10 в течение 40 ч

Сплав	КРП, мВ		ΔКРП, мВ
	Чистый образец	Образец под тонким слоем АМГ-10	
БрАЖ9-4	245	170	−75
БрО12	295	210	−85
БрОСН10-2-3	306	180	−126

носительно другой возникают два потока смазочного материала вдоль оси *x*:

фрикционный поток (или поток сдвига), созданный относительным движением поверхности и имеющий линейную эпюру скоростей;

поток, связанный с термическим расширением жидкости (из-за ее нагрева при трении и возникновения вследствие этого дополнительного напорного течения) и имеющий параболическую эпюру скоростей, создает в смазочном зазоре дополнительное избыточное давление и подъемную силу в паре трения, что обеспечивает ее несущую способность из-за уравновешивания внешней нагрузки.

В работе пар трения скольжения для данного режима нагружения при смешанном смазывании проявляется эффект термогидравлической опоры с плоскими и параллельными опорными поверхностями.

Термическое расширение смазочного материала при нагревании обусловлено несимметричностью тепловых колебаний молекул, ослаблением взаимодействия между ними и увеличением межмолекулярных расстояний и скорости теплового движения свободных молекул [14]. С ростом температуры повышается средняя энергия теплового движения, амплитуда колебаний и частота перескоков молекул из одного положения равновесия в соседние, что приводит к возрастанию объема смазочного материала, уменьшению удельного веса и плотности, снижению вязкости и обеспечивает лучшее проникновение смазочного материала к поверхностям контакта.

Из работ Б.И. Костецкого, Л.И. Бершадского, И.В. Крагельского и представлений классической термодинамики необратимых процессов в соответствии с принципами Гленсдорфа—Пригожина для открытых термодинамических систем, какой является узел трения, следует, что при его работе происходит образование диссипативной структуры, обладающей свойством минимального производства энтропии, и локализация всех взаимодействий трущихся тел и среды в тонкой смазочной пленке на поверхностях трения. Минимальное производство энтропии соответствует стационарному изменению коэффициента трения с минимальным трением и изнашиванием.

Значительная часть диссипативных процессов сопровождается проявлением аномальных вязкоупругих свойств смазочного материала, а их движущие силы связаны с изменением величин, характеризующих состояние узла трения: температур, давлений, напряжений, концентраций компонент смазочного материала в слое.

Долговечность и безотказность узлов трения зависят от состояния и свойств тонких смазочных пленок, разделяющих поверхности контакта. Внутреннее трение в смазочном слое активизирует трибомеханические и реологические диссипативные процессы, которые способствуют рассеиванию подведенной механической энергии как по деструктирующим механизмам, интенсифицирующим износ поверхностей трения, так и по защитным, в реализации которых заложен ресурс повышения работоспособности узлов трения [13].

Заключение

В результате выполненных исследований установлена структура физических процессов (рис. 3), сформулированы научные принципы управления процессом трения и износом деталей в узлах трения машин (рис. 4) и научно обоснованы способы обеспечения динамического равновесия между образованием и разрушением смазочных пленок на поверхностях контакта (рис. 5).

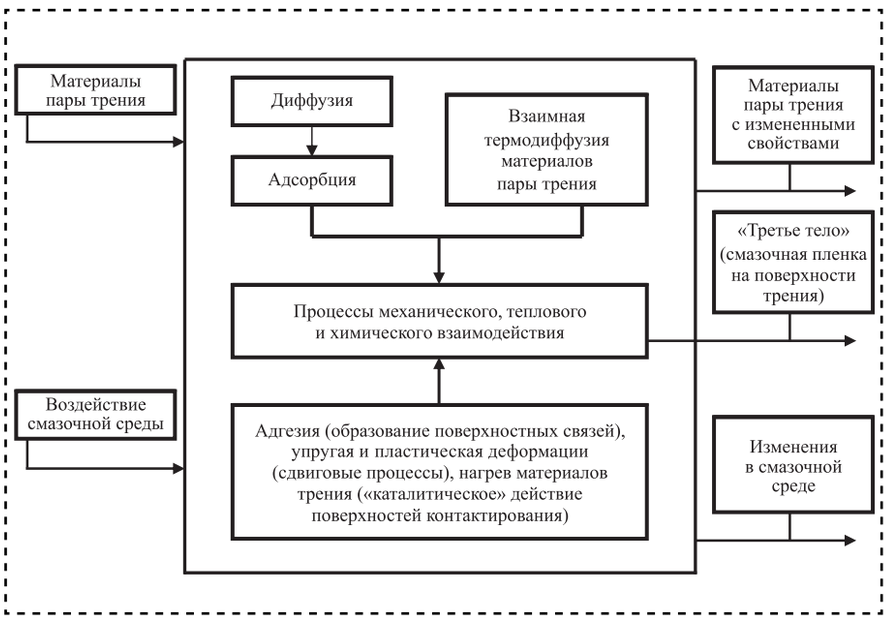

Рис. 3. Структура физических процессов, формирующих пару трения

sb218.indd 72 02.02.2018 11:19:31

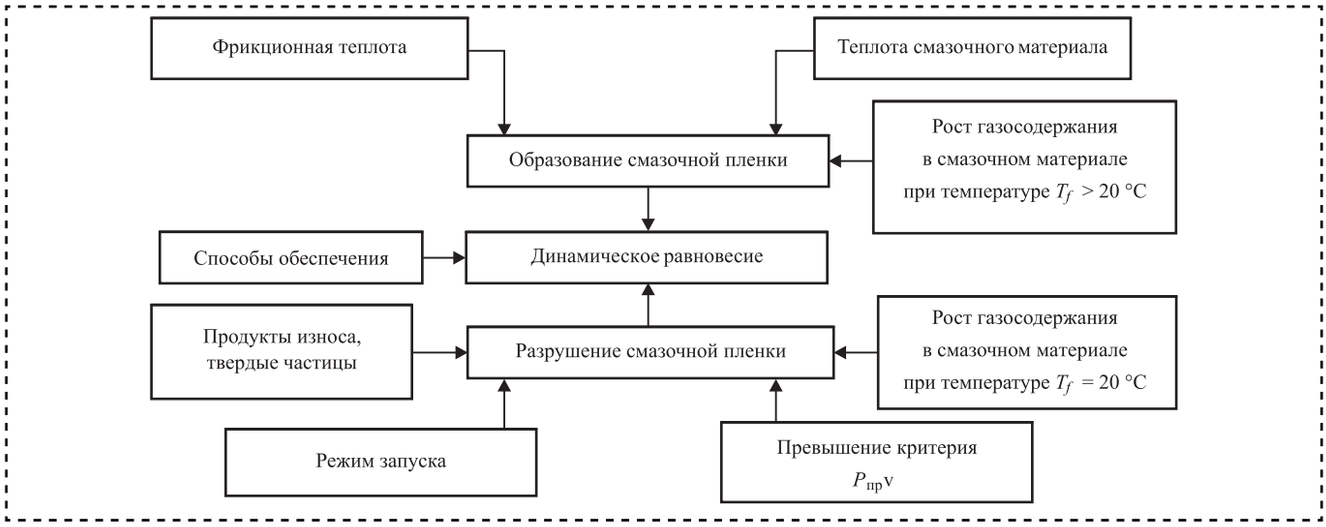

Рис. 4. Научные основы управления трением и изнашиванием в узлах трения машин

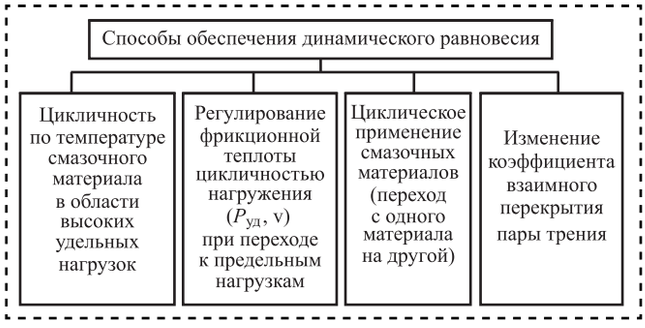

Рис. 5. Динамическое равновесие между образованием и разрушением смазочных пленок на поверхностях трения

Для предотвращения срыва смазочной пленки с поверхности контакта необходимо обеспечить определенный запас прочности, который создается обкаткой. Поверхности, прошедшие термохимическую и диффузионную обработку, обладают наследственностью, которая передается поверхностям контакта, т.е. имеет место динамическая равновесность поверхностей.

Пары трения при эксплуатации обладают свойствами, которые закладываются при обкатке, в частности, способностью приклеивания смазочной пленки. Кинетика химических реакций между поверхностями трения и смазочным материалом зависит от таких факторов, как высокая распределенная нагрузка на пятно контакта, относительное перемещение поверхностей пары трения, неравномерность энергетического состояния контактных поверхностей.

Библиографический список

1. **Меделяев И.А., Албагачиев А.Ю.** Трение и износ деталей машин. М.: Машиностроение, 2008. 462 с.

2. **Меделяев И.А.** Основные закономерности процесса трения и изнашивания в парах трения гидравлических машин // Вестник машиностроения. 2008. № 9. С. 42—47.

3. **Меделяев И.А.** Нормальный режим трения и долговечность антифрикционных пар со смазкой при повышенных нагрузках // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2006. № 8. С. 32—38.

4. **Приходько В.М., Меделяев И.А., Фатюхин Д.С.** Формирование эксплуатационных свойств деталей машин ультразвуковыми методами. М.: МАДИ, 2015. 264 с.

5. **Меделяев И.А.** Схватывание в узлах трения транспортной техники // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2012. № 10. С. 28—33.

6. **Меделяев И.А.** Диагностика температурной нагруженности антифрикционных пар трения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2005. Т. 71. № 6. С. 53—58.

7. **Меделяев И.А.** Явление термоупругой нестабильности контакта при смешанной смазке в узлах трения агрегатов транспортной техники // Вестник машиностроения. 2012. № 5. С. 34—39.

8. **Меделяев И.А.** Трибология сталей и сплавов при смешанной смазке в узлах трения технических систем // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. № 2. С. 63—73.

9. **Меделяев И.А.** Технологическая наследственность в узлах трения транспортной техники // Вестник машиностроения. 2012. № 8. С. 43—46.

10. **Меделяев И.А.** Технологическая и эксплуатационная наследственность трибосопряжений машин: сб. науч. тр. // VIII Международная научно-техническая конференция "Наукоемкие технологии на современном этапе развития машиностроения". М.: Техполиграфцентр, 2016. 270 с.

11. **Меделяев И.А.** Состояние смазочной пленки на поверхностях контакта при смешанном смазывании в узлах трения транспортной техники // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 10. С. 28—34.

12. **Меделяев И.А.** Влияние температуры на работоспособность трибосопряжений двигателей и гидравлических машин транспортной техники // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 9. С. 28—36.

13. **Меделяев И.А.** Управление работоспособностью узлов трения агрегатов транспортной техники // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 6. С. 28—41.

14. **Меделяев И.А.** Трибомутация при смешанной смазке в узлах трения транспортной техники // Вестник машиностроения. 2012. № 8. С. 43—48.

15. **Меделяев И.А., Албагачиев А.Ю., Сорокин Г.М.** Влияние поверхностной энергии на абразивное изнашивание материалов // Трение и износ. 2004. Т. 25. № 1. С. 85—92.

16. **Марков А.А.** Изменение работы выхода электрона при трении — электрические явления при трении, резании и смазке твердых тел. М.: Наука, 1973. С. 28—34.

sb218.indd 73 02.02.2018 11:19:31

УДК 621.91.02

М.Ш. Мигранов, С.Р. Шехтман *д-ра техн. наук,* **А.М. Мигранов**
(Уфимский государственный авиационный технический университет)
E-mail: migmars@mail.ru

Исследование многослойных композиционных покрытий для режущего инструмента

Представлены результаты экспериментальных исследований износостойкости режущего инструмента и показаны зависимости влияния температуры на трибологические характеристики контакта и композиционных многослойных покрытий.

The results of experimental studies of wear resistance of the cutting tool are presented and the influence of temperature on tribological characteristics of contact and composite multilayer coatings are shown.

Ключевые слова: многослойные изностойкие покрытия, трибологические характеристики, эпилама, индентор, изностойкость, фрезерование.

Keywords: layered wear proof coating, tribological characteristics, epilame, indentation, wear resistance, milling.

Повышение производительности лезвийной обработки резанием в значительной степени зависит от эффективного использования современного высокопроизводительного и дорогостоящего металлорежущего оборудования, оснащенного системами с числовым программным и адаптивным управлением, особенно в условиях гибких автоматизированных производств и мехатронных станочных систем, где наиболее слабым звеном технологической цепочки является режущий инструмент. При этом повышены требования, предъявляемые к качеству и надежности режущего инструмента, а также ужесточены условия его работы. Режущие инструменты таких систем работают при высоких контактных напряжениях и температурах, активации всех физико-химических процессов. При этом контактные площадки инструмента интенсивно изнашиваются от абразивного воздействия твердых включений в обрабатываемых материалах, протекания адгезионно-усталостных, коррозионно-окислительных и диффузионных явлений. В этих условиях работоспособность инструмента может быть повышена за счет изменения состояния приповерхностных свойств, при которых контактные площадки режущего клина будут наиболее эффективно сопротивляться изнашиванию, особенно при повышенных температурах. При этом инструментальный материал в объеме тела инструмента должен одновременно обладать достаточным запасом прочности при сжатии и изгибе, приложении ударных импульсов и знакопеременных напряжений. Перечисленные свойства обычно являются взаимоисключающими, и для создания режущего инструмента с комплексом указанных свойств на поверхности и в объеме тела в настоящее время используются различного рода износостойкие покрытия (ИП).

Широкое промышленное применение режущих инструментов с ИП позволяет: повысить стойкость и надежность инструмента; сократить удельный расход дорогостоящих остродефицитных инструментальных материалов; расширить область использования твердых сплавов и сократить номенклатуру применяемых сплавов стандартных марок и т.д. [1].

Износ любого трибосопряжения, в том числе режущего инструмента, проходит ряд стадий, которые базируются на различных трибопроцессах [1, 2]. Наиболее общая классификация процессов трения разделяет их на две группы:

— стационарные, т.е. с мало изменяющимися во времени трибопараметрами;

— изменяющиеся с определенной тенденцией.

Стационарному процессу в наибольшей степени соответствует нормальный износ, нестационарному — приработка и усиленный (или катастрофический) износ. Для режущего инструмента, работающего главным образом в условиях адгезионного изнашивания, усиленный износ аналогичен режиму заедания. Приработке соответствует процесс перехода к устойчивому состоянию, а заедание проявляется как неустойчивый процесс, который характеризуется самоускоряющимся возрастанием интенсивности изнашивания.

Поэтому представляется вполне рациональным разработка таких многослойных покрытий для режущего инструмента, очередной слой которых отвечал бы текущей фазе процесса изнашивания.

sb218.indd 74 02.02.2018 11:19:31

Нанесенные на инструментальные материалы покрытия позволяют значительно снизить силу трения [1, 2, 4]. Особенно это характерно для наиболее термодинамически устойчивых покрытий в виде оксидов некоторых металлов, а также для покрытий, склонных к диссоциации при температурах, соответствующих максимальным температурам резания. С повышением температуры увеличивается частота собственных колебаний валентных атомов, растет пластичность материала и снижается его сопротивляемость пластическому деформированию. Таким образом, даже при постоянном нормальном напряжении увеличиваются число активных центров и площадь фактического контакта. Повышение температуры способствует разрушению поверхностных пленок и образованию химически чистых, "ювенильных" поверхностей, проявлению схватывания и увеличению сил трения. Однако в результате дальнейшего повышения температуры происходят разупрочнение "узлов" схватывания и интенсивное окисление трущихся поверхностей, что может приводить к снижению сил трения.

Тепловые процессы при резании металлов — своеобразный индикатор, отражающий характер протекания целого ряда явлений, определяющих работоспособность режущего инструмента и качество формируемых поверхностей обрабатываемых деталей [4]. С повышением температуры инициируются процессы макро- и микроразрушения контактных площадок инструмента. При наличии на контактных площадках инструмента ИП снижаются работа деформации и силы резания [1, 2]. Это свидетельствует о снижении интенсивности основных источников тепла в зоне резания — деформационного и фрикционного по передней и задней поверхностям. ИП, отличаясь по своим теплофизическим характеристикам от соответствующих характеристик инструментальной матрицы, может также изменять или регулировать направление и интенсивность тепловых потоков: в сторону инструмента, детали и стружки, а также в окружающую среду. В этом случае снижение интенсивности основных источников теплоты и изменение направления тепловых потоков приведет к изменению теплового состояния инструмента и температуры резания.

Высокая износостойкость инструмента с твердыми покрытиями обусловлена тем, что последние выполняют функцию экрана контактных поверхностей инструмента от внешних воздействий при резании. В наибольшей степени это касается устойчивой стадии процесса (фазы нормального износа), когда основным требованием к покрытию является высокая износостойкость. Существенное повышение режущих свойств инструмента достигается при наличии дополнительного подслоя, сформированного за счет диффузионного насыщения азотом (ионное азотирование) поверхности быстрорежущей стали. Наличие азотированного подслоя обеспечивает минимальную пластическую деформацию твердого покрытия в процессе резания. По этой причине технология комбинированного упрочнения (ионное азотирование + покрытие) принята за базовую.

Для эффективной работы такого покрытия в нестационарных стадиях процесса износа предложено использовать дополнительные слои. В период приработки использован антифрикционный слой, позволяющий избежать повреждаемости твердого и хрупкого покрытия. Состав такого слоя и технология его нанесения могут варьироваться.

В качестве приработочного слоя использовали слой эпилама [1—3]. Эпиламирование заключается в нанесении на поверхность инструмента фторосодержащего поверхностно-активного вещества. Пленочное покрытие в виде плотно упакованного молекулярного монослоя располагается эквидистантно профилю макронеровности поверхности инструмента. Оно обладает высокой адсорбционной способностью, в связи с малой толщиной прочно удерживается на поверхности и заполняет ее поры. Поскольку поверхностная энергия масел, присутствующих в составах смазочно-охлаждающих жидкостей, используемых при работе инструмента, больше поверхностной энергии этой пленки, то в результате их молекулярного взаимодействия обеспечивается нерастекаемость масел и предотвращение их сдвига с поверхности. Разделение смазкой поверхностей трения препятствует их изнашиванию и интенсивному схватыванию на начальных стадиях работы инструмента.

Предположили, что если приработке инструмента отвечает эпиламированный слой покрытия, нормальному износу — слой покрытия, а катастрофическому износу — азотированный подслой, то следует ожидать существенного повышения износостойкости режущего инструмента. Провели исследования триботехнических характеристик в интервале температур 150...550 °С, соответствующем температурам резания при использовании быстрорежущих инструментов. Прочность адгезионных связей на срез $\tau_{пп}$, предельные нормальные напряжения $p_{r\text{н}}$ и индекс совместимости $K_c = \tau_{пп}/p_{r\text{н}}$ оценивали по методике, приведенной в работе [3].

Для оценки триботехнических параметров ($\tau_{пп}$, $p_{r\text{н}}$, $\tau_{пп}/p_{r\text{н}}$) использовали экспериментальный метод [3]. В основе этого метода принята физическая модель (рис. 1), которая в первом приближении отражает реальные условия трения и изнашивания на локальном контакте. Сферический индентор *2* (имитирующий единичную неровность пятна касания трущихся твердых тел), сдавленный двумя плоскопараллельными образцами *1* (с вы-

sb218.indd 75 02.02.2018 11:19:31

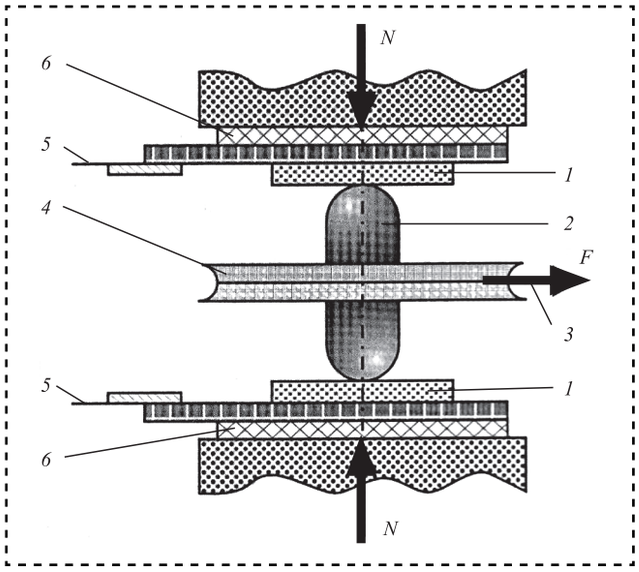

Рис. 1. Модель фрикционного контакта

сокой точностью и чистотой контактирующих поверхностей) вращается под нагрузкой вокруг собственной оси. Сила *F*, расходуемая на вращение индентора и приложенная к тросику *3*, уложенному в паз диска *4*, связаны главным образом со сдвиговой прочностью $\tau_{пп}$ адгезионных связей.

Для использования этого способа применительно к условиям повышенных температур контакта разработана специальная аппаратура, позволяющая проводить электроконтактный нагрев (через шины *5*, изолированные от корпуса прокладками *6*, см. рис. 1) зоны соприкосновения и обеспечивать характерное для трибоконтакта распределение температуры в приповерхностном слое. Разработаны также методы тарирования регулирования температуры контакта, а также получение зависимости величины $\tau_{пп}$ от нормальных напряжений $p_{r\text{н}}$ при различных температурах контакта [3].

Инденторы изготавливают из инструментальной стали Р6М5 без покрытий, с твердым покрытием (TiCr)N (нанесенным методом PVД) и с твердым покрытием (TiCr)N + слой эпилама (фторосодержащая композиция). Образцы изготавливали из стали 40Х (280...290 НВ). Исследования проводили с использованием пятипроцентной эмульсии на водной основе и без СОЖ.

Применение покрытий (TiCr)N и эпиламы существенно снижает прочность $\tau_{пп}$ на срез адгезионных связей и индекс совместимости K_c практически во всем исследованном диапазоне температур контакта (рис. 2). Этому способствует также применение СОЖ. В целом полученные результаты подтвердили прогноз об улучшении триботехнических свойств контакта инструментального и обрабатываемого материалов при использовании покрытий с программируемым послойным изменением свойств.

Экспериментальные исследования износостойкости режущего инструмента выполняли при попутном фрезеровании четырехперьевыми концевыми фрезами диаметром 12 мм заготовок из стали 40Х (280...290 НВ) со скоростью резания v = 21 м/мин, подачей на зуб S_z = 0,028 мм/мин, шириной b = 10 мм и глубиной t = 3 мм на фрезерном станке HSS-400-V "HECKERT".

Ширину фаски износа по задней поверхности на вершине зубьев $h_з$ и по лезвию измеряли с помощью микроскопа МИР 2М (МОВ) с точностью 0,01 мм. Во внимание принимали наиболее изношенный зуб. Критерий затупления $h_з$ = 0,3 мм. Для измерения износа через каждые 500...1000 м пути резания делали остановки. Исследовали работоспособность фрез, выполненных из карбидостали на основе Р6М5 и прошедших ионное азотирование с последующим нанесением покрытий методом PVD — (TiAl)N (67 HRC) или (Ti Cr)N (68 HRC) и эпиламированием.

Для сравнения выполняли стойкостные испытания цельных твердосплавных фрез из ВК8. Полученные результаты подтверждают многократное повышение периода стойкости режущих

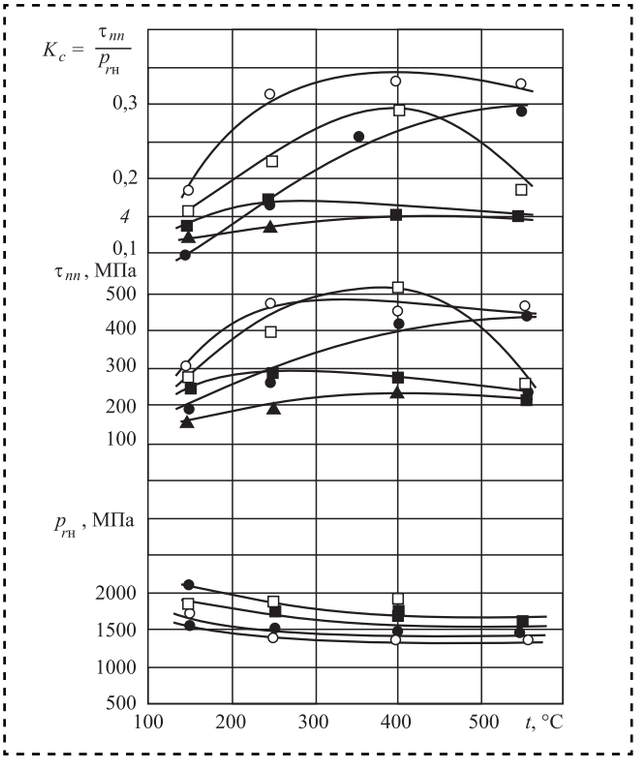

Рис. 2. Влияние температуры, состояния поверхности инструментального материала из Р6М5 и окружающей среды на трибологические характеристики контакта с обрабатываемым материалом — сталью 45 (в отожженном состоянии):

○ — без покрытия, без СОЖ; □ — с покрытием (TiCr)N, без СОЖ; ● — без покрытия, с СОЖ; ■ — с покрытием (TiCr)N, без СОЖ; ▲ — с покрытием (TiCr)N + эпилама, с СОЖ

sb218.indd 76 02.02.2018 11:19:31

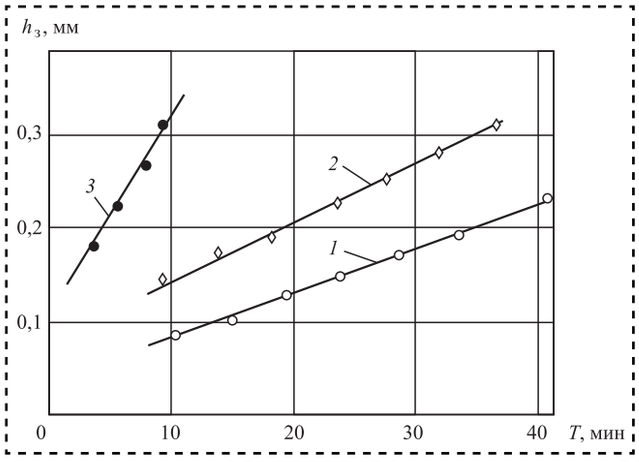

Рис. 3. Графики износа концевых фрез диаметром 12 мм при фрезеровании стали 40Х (280...290 НВ) (скорость резания v = 21 м/мин; ширина фрезерования b = 10 мм; глубина фрезерования t = 3 мм; подача на зуб S_z = 0,028 мм):
1 — фреза карбидостальная с покрытием (TiAl)N (67 HRC); *2* — карбидосталь с покрытием (TiCr)N (68 HRC); *3* — фреза твердосплавная

инструментов с многослойными покрытиями, имеющими программируемое изменение свойств (рис. 3), за счет уменьшения приработочного износа и снижения интенсивности нормального износа.

Вывод

Применение композиционных многослойных покрытий, каждый слой которых выполняет соответствующую функцию в каждой последующей фазе, — весьма перспективное направление в повышении износостойкости режущих инструментов.

Библиографический список

1. **Верещака А.С.** Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
2. **Мигранов М.Ш., Шустер Л.Ш.** Интенсификация процесса механообработки на основе использования эффекта самоорганизации при трении. М.: Машиностроение, 2005. 202 с.
3. **Шустер Л.Ш., Мигранов М.Ш.** Прибор для исследования адгезионного взаимодействия / Патент на полезную модель № 34249 от 24.06.2003 г.
4. **Шустер Л.Ш., Криони Н.К., Шолом В.Ю., Мигранов М.Ш.** Покрытия и смазка в высокотемпературных подвижных сопряжениях и металлообработке. М.: Машиностроение, 2008. 318 с.
5. **Криони Н.К., Мигранов М.Ш.** Покрытия и смазки для высокотемпературных трибосопряжений. М.: Инновационное машиностроение, 2016. 377 с.

УДК 539.21; 539.621

М.В. Ноженков, *д-р техн. наук (ЗАО "Техном-Т", Москва)*
E-mail: technomt@technom-t.ru

Вихревые потоки в диссипативных системах*

Исследовано влияние технологии получения на свойства покрытий, наносимых ионно-плазменными методами. Обнаружена зависимость вихревого движения частиц в процессе нанесения на кристаллическую структуру и свойства получаемого вещества. Установлена возможность создания конденсированной среды с вихревыми квантовыми потоками частиц, движущимися без рассеяния энергии по эквипотенциальным поверхностям среды, в виде подобных явлений (сверхнизкого трения, сверхпроводимости, сверхтекучести, роста кристаллов в вакууме). Возникновение бездиссипационного переноса частиц происходит в виде фазового перехода при критическом характерном параметре (преодоление энергетического потенциального барьера). Определены критерии, отвечающие за подобие исследованных физических явлений.

The technology of obtaining coatings applied by ion-plasma methods has been studied. The dependence of the vortex motion of particles in the deposition process on the crystal structure and properties of the obtained substance is found. The possibility of creating a condensed medium with vortex quantum flows of particles moving without scattering of energy along equipotential surfaces of the medium in the form of similar phenomena (super low friction, superconductivity, superfluidity, crystal growth in a vacuum) is established. The emergence without the dissipative transport of particles occurs as a phase transition at a critical value of the characteristic parameter (overcoming the energy potential barrier). The criteria responsible for the similarity of the investigated physical phenomena are determined.

Ключевые слова: ионно-плазменные покрытия, вакуум, частица, атом, рост кристаллов, сверхнизкое трение, сверхпроводимость, сверхтекучесть, потоки без диссипации энергии, броуновское движение, подобие, вихревое поле.

Keywords: ion-plasma coatings, vacuum, particle, atom, crystal growth, electron diffraction and electron microscopy, superlow friction, superconductivity, superfluidity, flows without energy dissipation, Brownian motion, similarity, vortex field.

* По материалам доклада на конференции "Трибология — машиностроению-2016".

sb218.indd 77 02.02.2018 11:19:31

Введение

Новые требования к физико-механическим свойствам рабочих узлов и деталей механизмов и машин определены развитием современных отраслей промышленности. Разработка технологии нанесения защитных покрытий на рабочие поверхности вакуумными ионно-плазменными методами и установление взаимосвязи с процессами роста и формирования покрытий с заданными свойствами, а также комплексные исследования кристаллической структуры и физико-механических свойств покрытий весьма актуальны.

Известно, что свойства вещества во многом определяются его кристаллической структурой, которая формируется в процессе его получения. Формирование анизотропных слоев вещества с вихревыми потоками веществ, движущихся без диссипации энергии возможны при выращивании кристаллов в виде слоев с заданными свойствами. Вещества с анизотропной структурой, обладают рядом необычных свойств и находят применение для получения сверхпроводимости и сверхнизкого трения [1—4].

Цель работы — создание конденсированной среды с вихревыми квантовыми потоками частиц, движущихся без рассеяния энергии по эквипотенциальным поверхностям среды в виде подобных явлений (сверхнизкого трения, сверхпроводимости, сверхтекучести, роста кристаллов в вакууме).

Методика проведения эксперимента и полученные результаты

Покрытия на основе переходных металлов IV—VI групп Периодической системы (оксидов хрома, нитридов молибдена и алюминия, дихалькогенидов молибдена и вольфрама — MoS_2, $MoSe_2$, WS_2 и WSe_2), наносили вакуумными ионно-плазменными методами [2]. Триботехнические испытания проводили на воздухе при нормальных атмосферных условиях на машинах трения УГС-1 по схеме диск—сфера (диаметр сферы 9,0 мм) при удельной нагрузке 10^5 Н/см^2, скорость скольжения 0,019 м/с. Проведение триботехнических исследований на воздухе создает более интенсивные условия эксплуатации, так как высокие антифрикционные свойства и большая долговечность дихалькогенидов проявляются в вакууме и инертных средах. Покрытия наносили при температурах подложки 283...1573 К на полированные образцы компактной керамики Al_2O_3. Структуру покрытий исследовали методом дифракции электронов на отражение в электронографе ЭМР-102М, морфологию поверхности — с помощью электронных микроскопов JXA-841 и JSM-35C, элементный состав полученных покрытий — методами спектроскопии характеристического рентгеновского излучения (JEM-100C с приставкой CEVEX) и рентгеновской фотоэмиссионной спектроскопии (ESCALAB-5) [2—11].

Один из основных параметров, влияющих на структуру и свойства таких покрытий, — температура. Поэтому исследовали влияние температуры подложки в процессе нанесения покрытий, а также формирование структуры при размещении образцов в центре и на периферии платы держателя подложек на кристаллическую структуру и триботехнические свойства.

При расположении образца в центре платы держателя при изменении температуры подложки формируются покрытия с гексагональ-

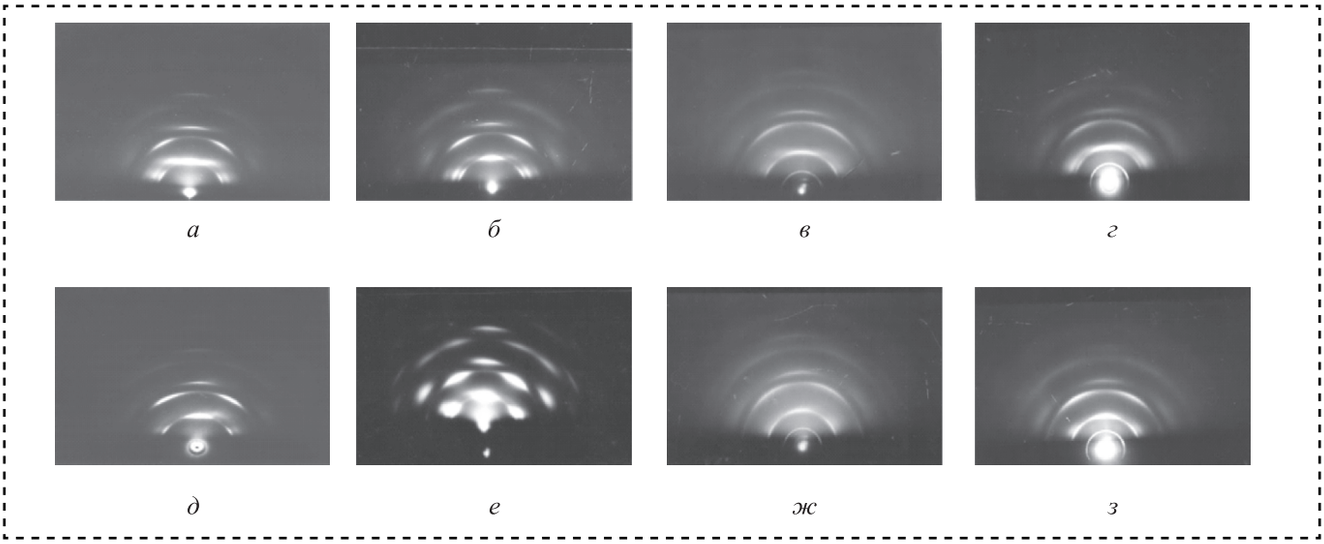

Рис. 1. Электронограммы покрытий MoS_2 (*а*, *д*), $MoSe_2$ (*б*, *е*), WS_2 (*в*, *ж*) и WSe_2 (*г*, *з*) толщиной 1,0 мкм, наносимых при температуре от 523 К (MoS_2) до 653 К (WSe_2) при расположении образцов в центре платы (*а—г*) и на ее периферии (*д—з*)

sb218.indd 78 02.02.2018 11:19:32

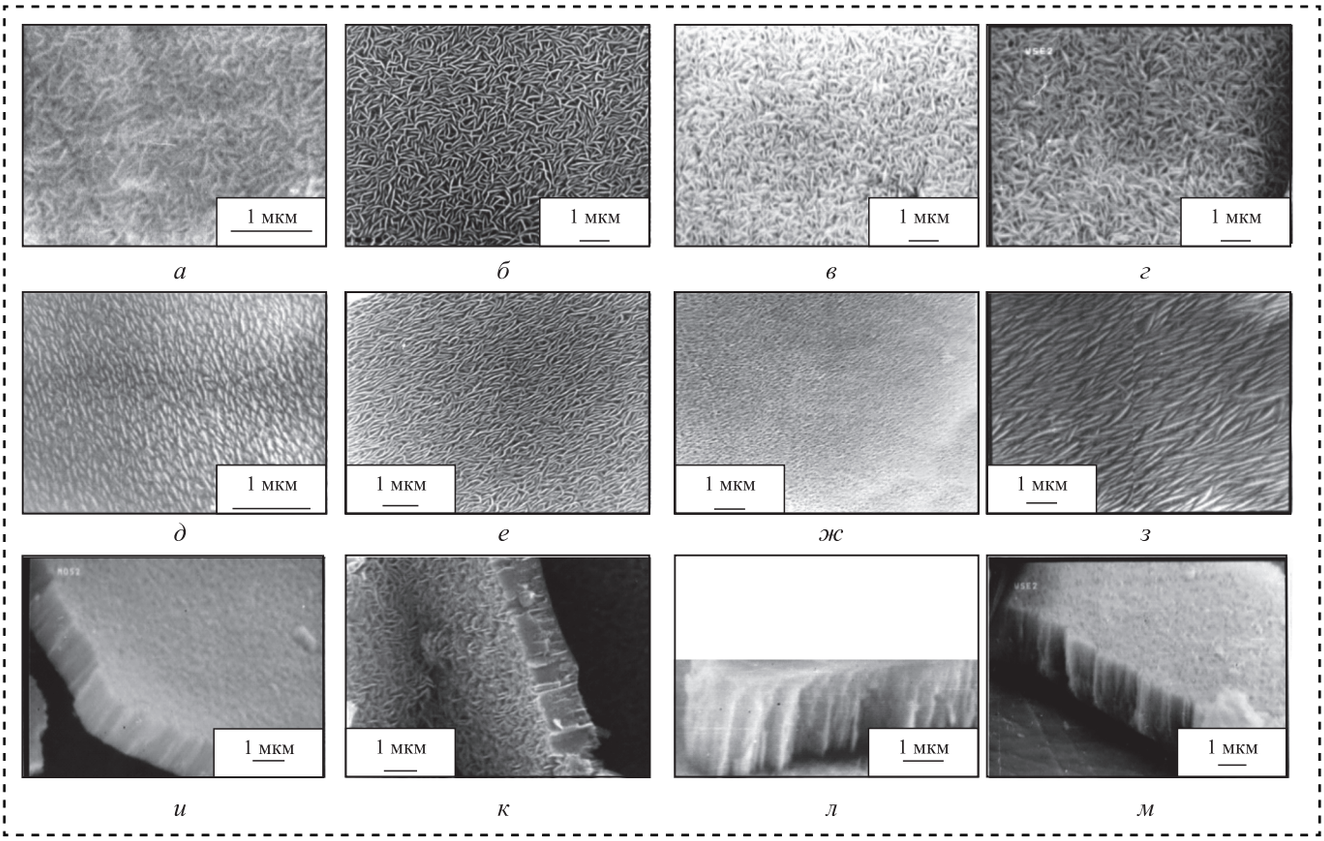

Рис. 2. Микрофотографии поверхности (*а—з*) и скола (*и—м*) покрытий MoS_2 (*а*, *д*, *и*), $MoSe_2$ (*б*, *е*, *к*), WS_2 (*в*, *ж*, *л*) и WSe_2 (*г*, *з*, *м*) толщиной 1,0 мкм, наносимых при температуре от 523 К (MoS_2) до 653 К (WSe_2) при расположении образцов в центре платы (*а—г*) и на ее периферии (*д—з*)

ной структурой типа 2H-MoS_2 и ориентациями кристаллитов с осями $[10\bar{1}0]$, перпендикулярными поверхности подложки (для $MoSe_2$, WS_2, WSe_2 в температурном диапазоне 473...973К) и $[11\bar{2}0]$ (для MoS_2 при температуре 673...773К) (рис. 1 и 2). Наименее низкую температуру кристаллизации наблюдали для покрытий из MoS_2, наиболее высокую для WSe_2 (рис. 3). Текстуры роста с осью $[10\bar{1}0]$ наблюдали у всех дихалькогенидов, тогда как текстура с $[11\bar{2}0]$ обнаружена у покрытий из MoS_2 в температурном диапазоне 673...773К [2—9].

При этом ось [0001] полностью разориентирована в плоскости, параллельной поверхности подложки. Совпадение направления пучка электронов в колонне электронографа с радиус-вектором, выходящим из центра платы, приводит к возникновению симметричной дифракционной картины, причем при параллельном перемещении образца в пучке вид дифракционной картины остается неизменным (рис. 1, *а, г* и рис. 2, *а, г*). При удалении на периферию происходит плавное возникновение второй текстуры с ориентацией оси [0001] параллельно поверхности с сохранением одновременной ориентации оси $[10\bar{1}0]$ перпендикулярно поверхности подложки (рис. 1, *в*, *г*).

Кристаллиты ориентируются практически правильно с небольшим угловым разбросом, что обеспечивает формирование дифракционной картины типа текстуры (рис. 2, *д, з*). При этом

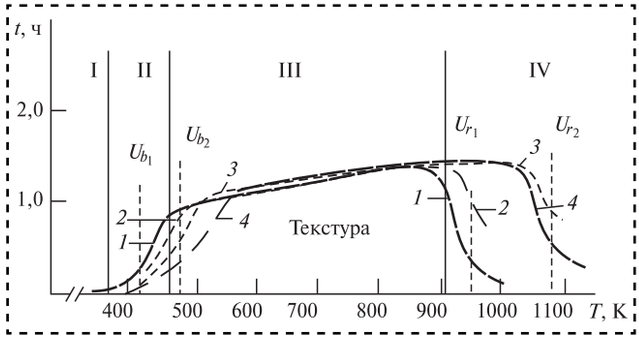

Рис. 3. Зависимость долговечности покрытий на основе дихалькогенидов на образцах из Al_2O_3 от температуры подложки при триботехнических испытаниях по схеме диск—сфера:

1 — MoS_2; *2* — $MoSe_2$; *3* — WS_2; *4* — WSe_2; I — аморфная структура; II — поликристалл; III — текстура; IV — область разложения дихалькогенида MX_2 на металл и халькоген; $U_{b1,2}$ — потенциальный барьер поверхности MoS_2 и WSe_2; $U_{r1,2}$ — энергии разложения дихалькогенидов MoS_2 и WSe_2

sb218.indd 79 02.02.2018 11:19:32

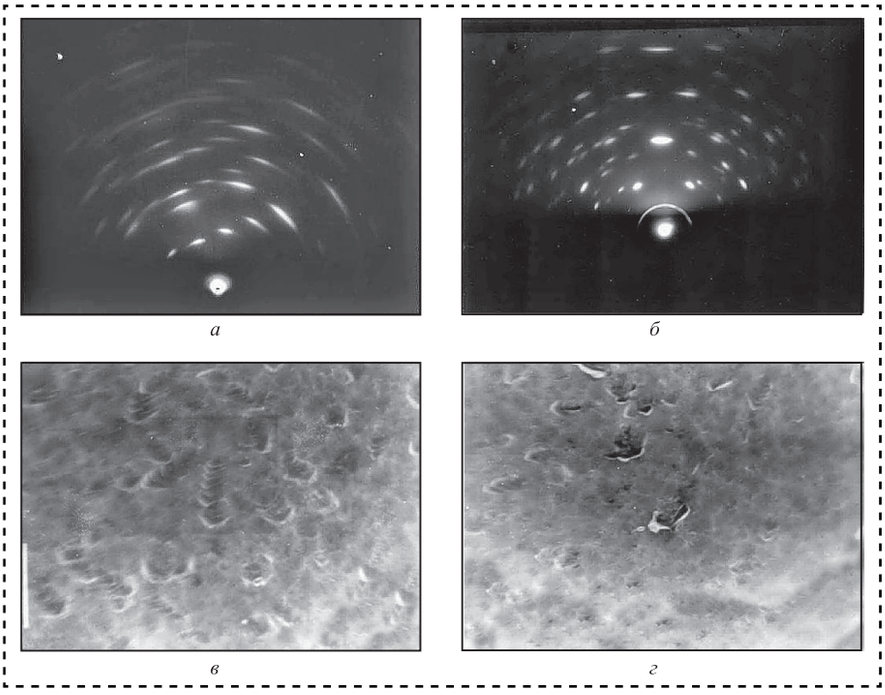

Рис. 4. Электронограммы (*а*, *б*) и микрофотографии (×5000) (*в*, *г*) покрытий AlN (*а*) и Cr_2O_3 (*б*, *в*, *г*)

кристаллиты при удалении от центра платы образуют замкнутые концентрические окружности (рис. 4). Такая закономерность роста сохраняется при нанесении покрытий других дихалькогенидов молибдена и вольфрама (например, $MoSe_2$, WS_2, WSe_2) (см. рис. 1 и 2).

Фазовый переход от аморфной структуры к кристаллической — нелинейный [2—10], т.е. происходит в диапазоне температур (см. рис. 3).

Однако область кристаллизации для $MoSe_2$, WS_2, WSe_2 в сравнении с дисульфидом молибдена MoS_2 смещена в зону более высоких температур. Наиболее высокие температуры перехода от аморфной структуры к текстурированной кристаллической наблюдали у диселенида вольфрама WSe, что сопровождалось соответствующим смещением области более высоких триботехнических характеристиках в зону более высоких температур. Это может быть связано со смещением потенциального барьера поверхностной энергии U_b в область более высоких температур для более тугоплавких соединений. Такое смещение приводит к увеличению ширины области кристаллизации. Наименьшая ширина области кристаллизации — у MoS_2 (473...523 K), наибольшая — у WSe_2 (493...563 K) [6—14].

Текстуры с осями $[10\bar{1}0]$ и $[11\bar{2}0]$ в покрытиях на основе дихалькогенидов являются текстурами роста, так как они возникают не на стадии зарождения, а на более поздних стадиях. Так, например, в случае нанесения дисульфида молибдена на полированные образцы из стали или Al_2O_3 при температуре 523 K покрытие неоднородно по толщине. Покрытия толщиной менее 0,08 мкм обладают аморфной структурой и имеют ровную поверхность. При фрикционных испытаниях такие покрытия не проявляли антифрикционного действия, как и в случае нанесения покрытий при низких температурах подложки. Покрытия, полученные при указанных условиях, толщиной более 0,1 мкм, имели хорошие антифрикционные свойства.

Растущая структура покрытий имеет характерный вид дендритной структуры с гребнеобразной формой (см. рис. 2). Преимущественный рост получают кристаллографические плоскости с индексами $(10\bar{1}0)$ с наиболее высокой поверхностной энергией. При этом атомно-гладкие плоскости (0001) растущих кристаллов, где действуют слабые силы Ван-дер-Ваальса, обеспечивают непрерывный приток мигрирующих атомов в область кристаллизации, что обеспечивает рост кристаллитов в виде пластинок.

Аналогичный механизм роста кристаллитов наблюдали при нанесении покрытий из нитрида алюминия AlN (гексагональная кристаллическая структура с решеткой вюртцита) методом магнетронного распыления. По мере удаления от центра формируются покрытия с осью $[10\bar{1}0]$ при наличии одновременной ориентации второй оси текстуры [0001] по радиусам из центра платы (рис. 4, 5). Вторая ось [0001] кристаллитов расположена под углом до 15° к поверхности подложки и при наклоне основной оси текстуры $[10\bar{1}0]$ соответственно в сторону центра.

При нанесении вакуумными ионно-плазменными методами и методом электронно-лучевого испарения (РЭП) покрытий из чистого молибдена и хрома, а также их соединений типа нитридов и оксидов с кубической объемно-центрированной кристаллической решеткой, в центре платы на образцах формировалось покрытие с осью текстуры [110]. По мере удаления на периферию ось текстуры [110] наклонялась в сторону центра (вплоть до перехода в текстуру с осью [111]) при одновременной ориентации оси [100] по радиусам из центра платы. В этом случае также сохранялся подобный механизм роста кристаллов. На рис. 4 практически не просматривается двухмерной вытянутости кристаллов, как в случае дихалькогенидов переходных металлов, что

sb218.indd 80 02.02.2018 11:19:32

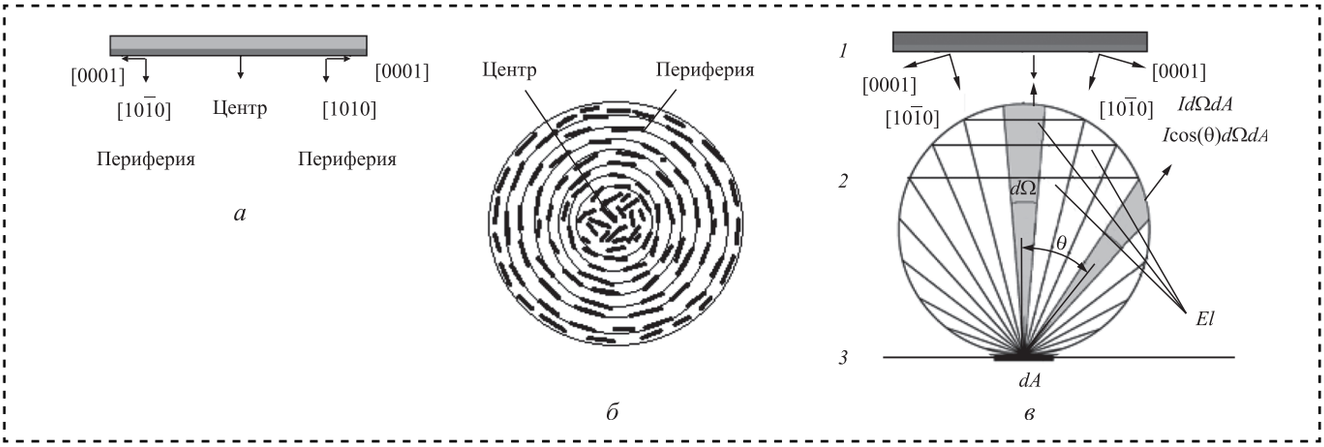

Рис. 5. Поверхность покрытий:
а — вид покрытия сбоку; *б* — вид поверхности покрытия сверху; *в* — схема нанесения; *El* — эквипотенциальные линии потока распыленного вещества; *1* — плата с наносимым покрытием; *2* — распределение распыленного вещества по закону косинуса; *3* — распыляемая мишень

связано с отсутствием столь значительной анизотропии поверхностной энергии кристаллографических граней.

Покрытия Cr_2O_3 имеют гексагональную структуру, пространственная группа $D_{3d}^6 - R\bar{3}c$. Рост кристаллов Cr_2O_3 подчинялся той же закономерности: в центре платы формируется текстура с осью $[10\bar{1}0]$, перпендикулярной поверхности подложки, при удалении на периферию происходил плавный наклон осей $[10\bar{1}0]$ в сторону центра с одновременной ориентацией оси [0001] по радиусам из центра держателя образцов. По мере удаления от центра формируются покрытия с осью [1010] при наличии одновременной ориентацией второй оси текстуры [0001] по радиусам из центра платы (см. рис. 4). Вторая ось [0001] кристаллитов расположена под углом до 15° к поверхности подложки и при наклоне основной оси текстуры [1010] в сторону центра соответственно.

Рост температуры подложки выше температуры нелинейного фазового перехода от аморфной структуры к кристаллической приводит к дальнейшему практически линейному росту размера кристаллов в покрытиях при сохранении дендритного строения поверхности для покрытий всех дихалькогенидов (см. рис. 3). При фрикционных испытаниях дихалькогенидные покрытия с аморфной структурой не проявляли антифрикционного действия, в то время как покрытия с кристаллической структурой имели достаточно высокие триботехнические характеристики. Подобные свойства наблюдали для покрытий из всех исследованных дихалькогенидов. Антифрикционные свойства кристаллических покрытий с ростом кристаллитов повышались пропорционально размеру кристаллов при изменении только температуры подложки.

Дальнейшее увеличение триботехнических свойств покрытий возможно посредством изменения технологии нанесения и создания легированных многослойных покрытий с износостойким подслоем [2—11, 26—28]. Например, увеличение твердости подложки приводит к снижению коэффициента трения и росту долговечности покрытий на основе дихалькогенидов, что объясняется легкостью раскалывания кристаллитов и формированием преимущественной ориентации оси [0001], перпендикулярной поверхности в процессе трения, обеспечивающей легкость скольжения пакетов X—M—X (X — халькоген, M — металл) дихалькогенида друг относительно друга. Также триботехнические и физико-механические характеристики улучшаются при легировании дисульфида молибдена [2—10].

Исследования механизма роста износостойких покрытий свидетельствуют о возникновении подобия на разных шкалах измерения покрытий на основе дихалькогенидов молибдена и вольфрама (MoS_2, $MoSe_2$, WS_2 и WSe_2), а также подобия покрытий на основе оксидов хрома, нитридов молибдена и алюминия, наносимых ионным распылением в вакууме. Подобие структуры покрытий заключается в формировании текстур с двумя осями (см. рис. 5) [2—11, 26—28].

Легированные покрытия из дисульфида молибдена состава MoS_2D_x по внешнему виду практически не отличаются от обычных покрытий MoS_2. В качестве легирующего вещества D могут быть выбраны элементы или соединения, не образующие сильных (химических) связей с основной решеткой MoS_2. При фрикционных испытаниях по схеме диск—сфера покрытий с кристаллической структурой гексагонального дисульфида молибдена 2H-MoS_2 получены до-

sb218.indd 81 02.02.2018 11:19:32

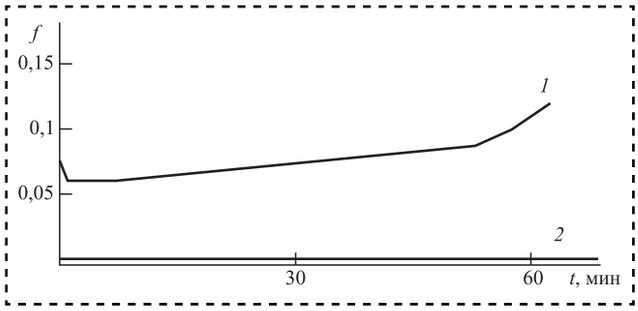

Рис. 6. Зависимость коэффициента трения от длительности испытаний легированных покрытий на основе дисульфида молибдена:
1 — MoS_2; *2* — MoS_2D_x

статочно низкие значения коэффициента трения, но в целом соответствующие трению природного дисульфида молибдена. Фрикционные испытания в тех же условиях покрытий состава MoS_2D_x привели к получению необычно низких значений коэффициента трения (эффекта сверхнизкого трения) (рис. 6).

Электронографические исследования покрытий MoS_2D_x показали, что в них произошло значительное увеличение периода решетки вдоль оси *c* от 1,2295 нм для соединений со стехиометрическим составом (гексагональный 2H-MoS_2) до 1,38...1,43 нм при практически неизменном периоде вдоль оси *a*. Увеличение расстояния между слоями при размещении атомов D в межпакетных пространствах в силу того, что энергия взаимодействия Ван-дер-Ваальса меняется пропорционально r^{-6}, приводит к уменьшению этого взаимодействия практически на порядок. В соответствующих условиях возможна реализация движения таких атомов без диссипации энергии в виде эффекта сверхнизкого трения. Нанесение легированных многослойных покрытий приводит к возможности получения сверхнизкого трения при нормальных атмосферных условиях на воздухе и сопровождается возрастанием долговечности покрытия в несколько раз.

Установлено, что наиболее высокими антифрикционными свойствами обладают покрытия из дихалькогенидов с кристаллической структурой, покрытия с аморфной структурой практически неработоспособны. Легирование кристаллических покрытий приводит к получению эффекта сверхнизкого трения.

Обсуждение результатов исследований

В работах [2—11] рассмотрено подобие двухфазных явлений (процесса трения, текучести жидкости, проводимости электрического тока, роста кристаллов в вакууме, термоэлектричества) и определены критерии подобия как соотношение количества двух фаз (потоков частиц) с различными свойствами. В основе рассуждений лежат принцип и гипотеза Ларса Онсагера [12], флуктуационно-диссипационная теорема, которая связывает флуктуации системы (их спектральную плотность) с динамическими и диссипативными свойствами [13], а также возможность переноса вещества без диссипации энергии при движении по эквипотенциальным поверхностям [2—11].

Современные представления электродинамики о движении заряженных частиц базируются на постулатах теории относительности (ТО), преобразованиях Лоренца и теории статического электрического поля. Преобразования координат и времени какого-либо события при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой зависят от скорости движения материальных тел друг относительно друга.

Преобразованиями Лоренца называются преобразования, которым подвергаются пространственно-временные координаты каждого события при переходе от одной инерциальной системы отсчета (ИСО) к другой. Аналогично, преобразованиям Лоренца при таком переходе подвергаются координаты любого вектора. Рассмотрим преобразования Лоренца для пространственных координат и времени электрического и магнитного полей в разных системах отсчета [14—17, 23—25]:

$$x = \frac{x' + \mathrm{v}t'}{\sqrt{1-\beta^2}};\ y = y',\ z = z';\ t = \frac{t' + \left(\mathrm{v}/c^2\right)x'}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad (1)$$

где *c* — скорость света в вакууме;

$\beta = \mathrm{v}/c$.

Формулы, выражающие x', y', z', t' через *x*, *y*, *z*, *t*, получаются из соотношения (1) заменой v на −v.

При движении материального тела со скоростью v и использовании преобразований Лоренца происходит сжатие длины

$$l' = l_0\left(1 - \mathrm{v}^2/c^2\right)^{1/2} \quad (2)$$

и замедление времени

$$t' = t_0\Big/\left(1 - \mathrm{v}^2/c^2\right)^{1/2}. \quad (3)$$

Штрихом отмечены координаты и время движущейся со скоростью v системы. При переходе из одной системы отсчета в другую (движущуюся относительно первой) со скоростью v проекции векторов электромагнитного поля $\boldsymbol{E}$, $\boldsymbol{H}$ связаны между собой преобразованиями Лоренца:

$$\vec{\boldsymbol{E}}' = \frac{1}{c}\,\frac{[\mathrm{v}\times\boldsymbol{H}]}{\sqrt{1-\beta^2}}. \quad (4)$$

sb218.indd 82 02.02.2018 11:19:33

Представления Лоренца об электронном строении вещества основаны на предположении о существовании эфира и представлениях о строении и движении электронов. Согласно которым при движении материального тела происходит его сжатие вдоль направления перемещения пропорционально скорости перемещения, что связано с упругим взаимодействием движущейся частицы с особой средой, названной эфиром. В ходе дальнейших исследований не было подтверждено влияние эфира на изменение геометрии тел. Поэтому изменение размеров тела в процессе движения принято в виде постулата. Наличие статического электрического поля не объясняет причин возникновения движения заряженных частиц по закону Кулона. Закон сохранения энергии утверждает, что энергия тела никогда не исчезает и не появляется вновь, она может лишь превращаться из одного вида в другой. Получение энергии из вакуума не представляется возможным, энергию вакуума не удается вычислить как собственное значение для гамильтониана вакуумного состояния [14—17, 23—25], т.е. как источника энергии. Следовательно, возникают несоответствия закону сохранения энергии.

Изложим несколько иные представления о движении электрона с полем в среде.

Электрон и среда, в которой он находится, включают несколько экспериментально измеренных параметров: r_{me} — классический радиус электрона (радиус Лоренца или длина томсоновского рассеяния); $r_{де}$ — комптоновский радиус электрона; c_0 — скорость света; α — постоянную тонкой структуры; $\lambda_{де}$ — комптоновскую длину волны вероятности; h — постоянную Планка; ν — частоту колебаний электрона; q — заряд [18, 19]. Эти параметры свидетельствуют о наличии волновых и корпускулярных (квантовых) свойств электрона. Исследования ряда явлений (излучения раскаленных тел, фотоэффекта, атомных спектров) привели к выводу, что энергия испускается и поглощается не непрерывно, а дискретно, отдельными порциями (квантами). Масса покоя электрона m_e — это масса в системе отсчета, относительно которой данная частица неподвижна. Электрон имеет собственный момент количества движения (спин) S. Масса электрона может быть переменной в зависимости от его скорости. Квантово-механическое свойство частиц — собственный момент количества движения частицы в равновесии (спин) S равен дробной или целочисленной (1/2 или 1) постоянной Планка. В связи с этим можно говорить о целом или полуцелом спине частицы как квантовой характеристике

$$h = m_e c_0 \lambda_{де}, \qquad (5)$$

где c_0 — измеренная скорость света [16, 17];

r_{me} — радиус кривизны, определяющий массу,

$$r_{me} = \mu_0 q^2 / 4\pi m_e, \qquad (6)$$

где μ_0 — магнитная постоянная.

Из формул (5), (6) следует постоянство скорости света c_c в инерциальных системах отсчета, движущихся с различными скоростями v_v. В то же время в сильных гравитационных полях c_c будет замедляться пропорционально плотности среды ρ_c и β.

Тем самым приходим к взаимосвязанным уравнениям (5), (6), подобным преобразованию Лоренца для движущегося тела, с использованием не линейной, а синусоидальной скорости света c_c. Вокруг частицы существует электрическое поле, которое подчиняется законам Максвелла. Элементарная частица (электрон) с электрическим полем находится в среде, формируемой полями других частиц, и сама среда определяет подобие параметров и характеристики (радиус массы $1/rm_e$, волновой радиус $r_{де}$, спин $1/2h$) частиц. Индексом i отмечены параметры и характеристики среды, индексом e — параметры частиц (рис. 7). Представленные константы — критерии подобия, которые в свою очередь, также состоят из измеренных констант. Например, постоянная тонкой структуры α, постоянная Планка h, а также линейная скорость света c_0, при изменении параметров, их составляющих, сохраняют постоянство отношения этих параметров. Электрону присуще линейное изменение энергии поля и нелинейный рост массы вблизи центра частицы (на длине волны де Бройля).

Среда. Формирование и свойства среды изложены в работах [4—10, 25—27], где рассмотрены свойства среды и причины вихревого (по спирали в виде соленоида) движения. Электромагнитные и гравитационные поля, создающие среду, это особая форма материи, которая создается электрическими зарядами и оказывает воздействие на другие заряды. Плотность среды ρ_c — количественная характеристика суммарного поля определяется принципом суперпозиции суммарной массы поля в единице объема среды. Результат воздействия на частицу нескольких внешних сил есть векторная сумма воздействия этих сил. Любое сложное движение можно разделить на два и более простых. Поведение электрона определяется свойствами среды, в которой находится электрон.

Рассмотрим свойства среды, в которой находится электрон, условия ее формирования. При обсуждении преобразований Лоренца обнаружено нарушение закона сохранения энергии. Для сохранения этого принципа суммы полей среды должны иметь соответствующие движению частицы моменты количества движения. Исследование движения частиц и процесса передачи движения от среды к находящейся в ней частице соответствую-

sb218.indd 83 02.02.2018 11:19:33

щего количества движения осуществим с использованием закона Кулона. Тем самым суммарные поля всех частиц определяют среду, в которой находятся частицы. Сформированная полями среда в свою очередь определяет строение находящихся в ней частиц. Взаимодействие определяет возникновение элементов подобия между средой и частицами. Среда в точке характеризуется кривизной k_r, радиусом r_m и плотностью среды ρ_c, которая формируется из полей элементарных частиц и является суммой радиусов кривизны вихревых полей

$$1/r_{me} = \sum_{i=1}^{n} 1/r_{mi}.$$

Математически скорость света c_c является пределом суммы ряда обратных величин скорости вихревых полей всех частиц в данной точке пространства, которая и определяет скорость света в векторной точке, как скорость движения суммы полей $1/c_{c0} = \sum_{i=1}^{n} 1/c_{ci}$.

Радиусы кривизны массы вихревой среды как предел суммы вихревых полей $1/r_{me}$ и тем самым скорость света c_{c0} можно представить математически пределом суммы числового ряда полей всех частиц в данной точке векторного поля.

Отношение $r_{де}/r_{me}$ представляет собой кривизну массы r_{me} с неэвклидовой геометрией (типа геометрии Лобачевского) к кривизне $r_{де}$ с неэвклидовой геометрией (типа геометрии Римана) и равно $\alpha = 7{,}2973525664(17)\cdot 10^{-3} = 1/137{,}035999139(31)$ (постоянной тонкой структуры) [16, 17]. Тем самым постоянная тонкой структуры представляет собой отношение пределов числовых последовательностей r_{me} и $r_{де}$ [5—10].

Каждая частица имеет собственное поле, сфера расположения которого простирается от волнового радиуса частицы $r_{де}$ на весьма существенное максимальное расстояние $r_{di\max}$ (см. рис. 7). Отсутствием движения поля можно считать отсутствие возможности соответствующих средств измерения и точности приборов обнаружения поля. Частица вращается со скоростью c_c по волновому радиусу вокруг центра частицы, далее скорость вращения поля частицы c_{cR} увеличивается пропорционально расстоянию $r_{дi}$ от центра вращения, а энергия уменьшается согласно

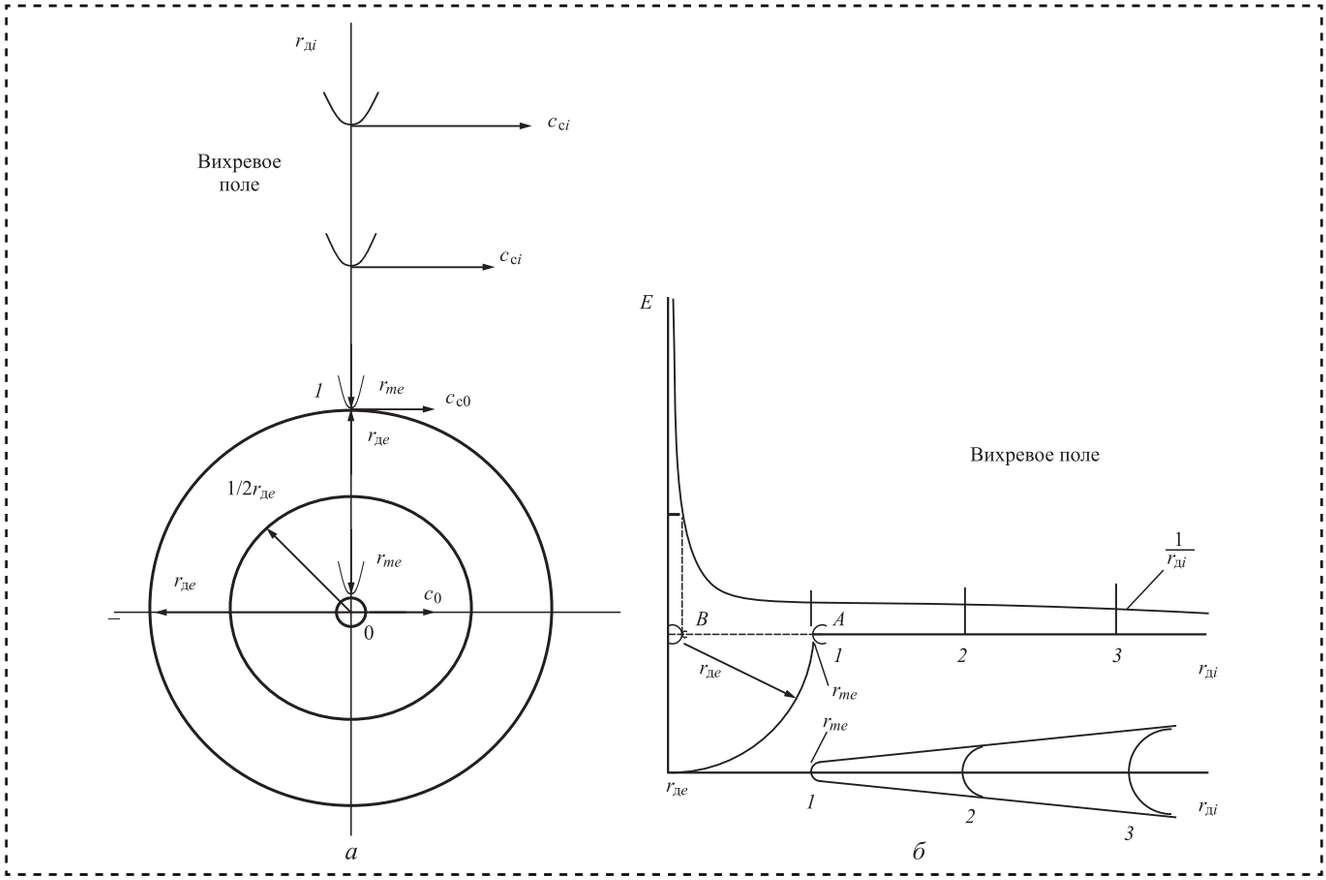

Рис. 7. Строение электрона (*а*) и вихревого поля электрона (*б*): $E = k\dfrac{1}{r_{дi}}$

sb218.indd 84 02.02.2018 11:19:33

кулоновскому закону пропорционально $1/r_{дi}$. Если предположить, что время переменно, то скорость света постоянна (инвариантна) и наоборот, что соответствует принципу относительности. Постоянство скорости света с течением времени в уравнении (1) относится к движению массы электрона m_e. Соотношение между волновым радиусом $r_{де}$ и радиусом массы r_{me} равно постоянной Зоммерфельда (или постоянной тонкой структуры) α [16, 17], которая собственно и определяет геометрию частицы. Масса частицы имеет конечную величину и определяется радиусом r_{me}, расположенным на волновом радиусе $r_{де}$ (см. рис. 7). Среда, в которой находится электрон, представляет собой суперпозицию электрических вихревых полей, участвующих во взаимодействии. Все частицы связаны (квантово спутаны) между собой. Вихревое движение частицы является подобием вихревого движения среды. Прохождение потока вихревого поля через частицу вызывает ее вихревое вращение. Среда и распространение границы среды определяются возможностями средств измерения. Принцип неопределенности применим при условии предела точности измерений:

$$\Delta x \Delta p \geqslant \frac{\hbar}{2}. \qquad (7)$$

Согласно принципу неопределенности можно представить вращающиеся поля условно неподвижными в каждой точке, так как невозможно определить одновременно импульс и координату частиц и полей. Вихревое поле можно определить как векторное поле, которое имеет замкнутые силовые линии [14—17, 29, 30].

Электрон в среде имеет свойства волчка в потенциальном поле среды и представляет собой волну де Бройля наибольшей вероятности обнаружения частицы (рис. 8, *б*). Поэтому следует говорить об особых свойствах среды.

Движение частицы с постоянной скоростью возможно только вдоль эквипотенциальных поверхностей потенциального поля. Движение поперек силовых линий приводит к изменению скорости частицы (ускоренному движению) и изменению массы частицы пропорционально изменению скорости (рис. 8). Поскольку инертная масса тела равнозначна его гравитационной массе, в физических процессах реализуется принцип эквивалентности масс. Изменение скорости движения частицы возможно с помощью потенциального поля большей плотности. Рост массы инертной частицы при ее перемещении из среды плотности ρ_1 (рис. 8, *а*) к среде плотности ρ_2 (рис. 8, *б*) тождественен росту гравитационной массы. Масса движущейся (рис. 8, *б*) частицы подобна покоящейся в среде с плотностью ρ_2 частице с большей массой (рис. 8, *в*). При этом плотность среды не является

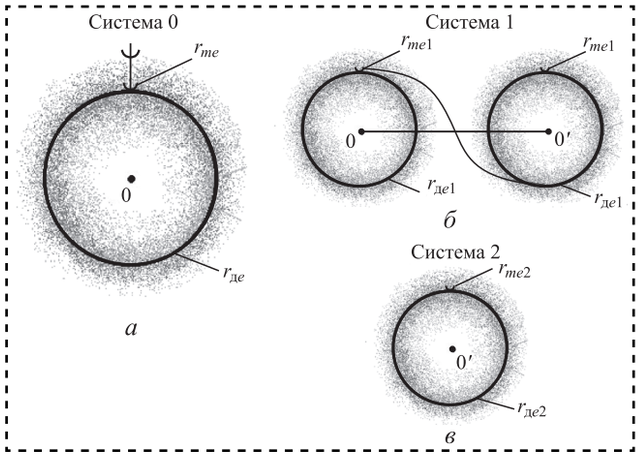

Рис. 8. Электрон, покоящийся (*а*) в системе 0 (при v = 0, плотности ρ_1), движущийся (*б*) в системе 1 (при скорости v_1, плотности среды ρ_{1-2}), покоящийся (*в*) в системе 2 (при v = 0, плотности среды ρ_2)

постоянной, зависит от спектральной плотности флуктуаций и способности диссипативной среды реагировать на внешние воздействия [12—13].

Передача взаимодействия происходит за временной промежуток

$$t_{де} = r_{де}/c_0,$$

где c_0 — измеренная скорость света.

За время $t_{де}$ происходит формирование и обновление всех систем, состоящих из таких частиц, что является подобием системы с одинаковой тактовой частотой. Отсюда следует постоянство частоты колебаний $\gamma_{де} = 1/t_{де}$. Строение таких частиц со смещенным центром масс полностью согласуется с представлениями об облаке вероятности электрона [5—10, 25—27]. Неевклидова геометрия среды проявляется на малых расстояниях (менее 10^{-10} м).

Основные свойства вихревого поля частицы:

— вихревое поле частиц представляет собой векторное пространство, каждая точка которого характеризуется скоростью c_{ci};

— существует смещение центра массы электрона (вихревого вращения поля частицы) на величину α;

— область с наибольшей массой m_{e0} и плотностью $\rho_{c0} = 1/r_{me}$, вероятность обнаружения которой располагается на комптоновской длине волны $\lambda_{де}$, является ядром частицы;

— отношение радиусов кривизны $r_{me}/r_{де} = \alpha$, что обеспечивает размещение 126 электронов на орбите атома согласно периодическому закону;

— вихревое поле частицы вращается вокруг центра со скоростью c_{ci}, подчиняется уравнениям Максвелла [16] и обладает такими свойствами, как ротор и дивергент;

— поле частицы может беспрепятственно проходить сквозь другие частицы и поля, однако

sb218.indd 85 02.02.2018 11:19:33

такое прохождение поля (причина) вызывает изменение кривизны поля частицы (следствие);

— векторная среда квантована в каждой точке и флуктуации плотности среды выравниваются посредством образования в ней новых частиц.

Дивергенция есть дифференциальный оператор, отображающий векторное поле на скалярное (в результате применения к векторному полю операции дифференцирования получается скалярное поле), который определяет (для каждой точки), насколько расходятся входящий и исходящий потоки.

Ротор или вихрь — это векторный дифференциальный оператор над векторным полем. Результат действия этого оператора на конкретное векторное поле называется ротором этого поля и представляет собой новое векторное поле. Такое поле характеризует вращательную составляющую поля в соответствующих точках. С помощью теоремы Гельмгольца можно представить распределение скоростей сплошной среды с разделением на вращательное (ротор) и поступательное (градиент) движение среды.

Рассмотрим движение электрона по закону Кулона с выполнением закона сохранения энергии. Определим причины, приводящие к движению частиц, как неотъемлемого свойства элементарных частиц. Предположим, что движущийся объект (частица) сжимается поперек направления движения, собственная скорость c_{cv} вращения частицы уменьшается с пропорциональным ростом скорости v. При этом скорость движения частицы никогда не превысит синусоидальную скорость света c_c. Кулоновское взаимодействие возникает при движении пробной частицы поперек эквипотенциальных поверхностей и вдоль силовых линий потенциального поля. Эквипотенциальные поверхности — понятие, применимое к любому потенциальному векторному полю, например, к электрическим или гравитационным полям. Различают два основных типа векторных полей: потенциальные (безвихревые) и вихревые (соленоидальные) поля [12—19, 29—30].

Наложение двух вихревых полей и создание квантовой суперпозиции общего поля — результат взаимодействия частиц. Сначала рассмотрим систему частиц в среде, состоящей из частицы с отрицательным зарядом *1* и симметрично окруженной положительными зарядами *2* в сумме (рис. 9, *а*). Затем — кулоновское взаимодействие пробной частицы *1* при сдвиге заряда *2′* как флуктуацию, далее — отдельно от взаимодействия пробной частицы *1* со средой *2* образование вихревого движения частицы подобно соленоиду. Каждая частица имеет вращающееся вокруг нее поле,

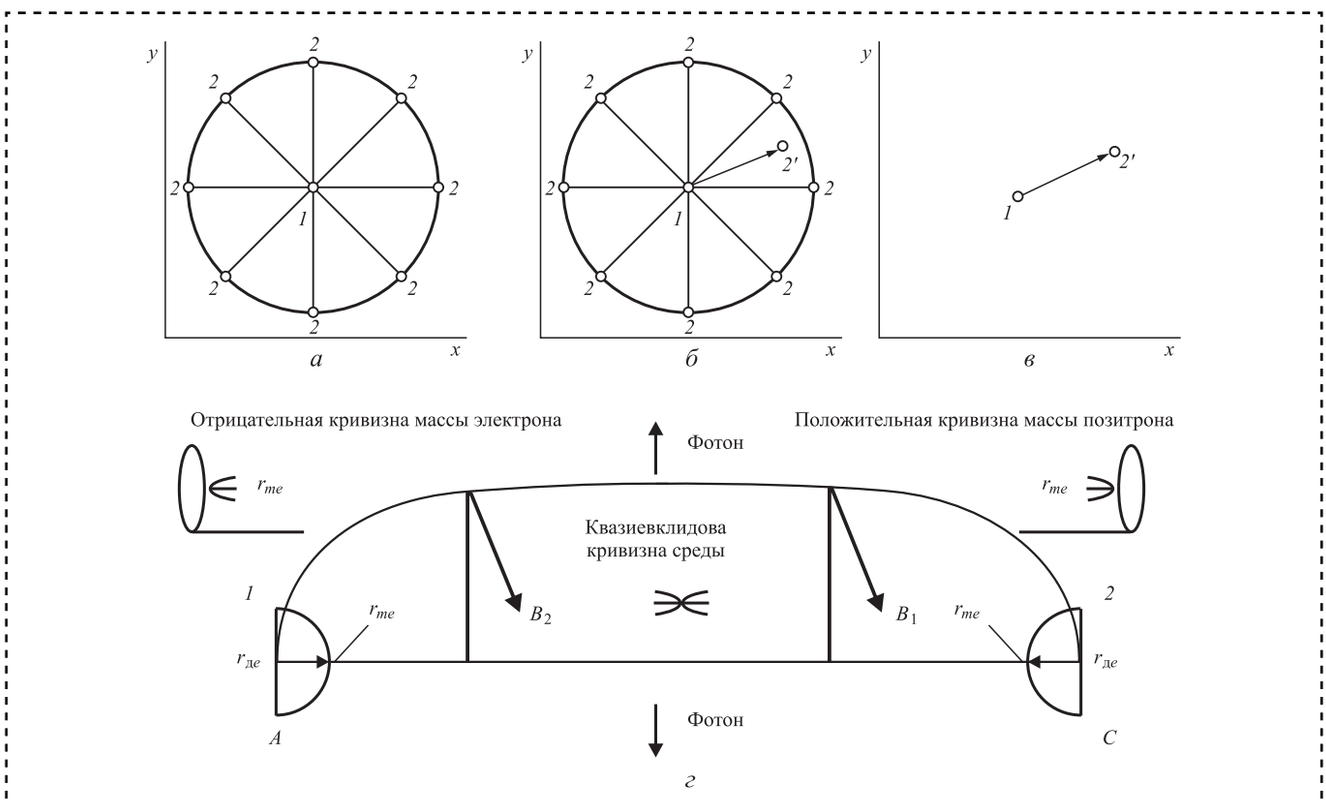

Рис. 9. Взаимодействие частиц в симметричном поле (*а*), с нарушенным равновесием (*б*), ток частиц (*1* и *2*) (*в*) и реакция $e^- + e^+ = 2\gamma$ (B_1 и B_2 индукции магнитного поля суммарного тока частиц) (*г*)

sb218.indd 86 02.02.2018 11:19:33

геометрия которого зависимости от знака заряда. Представленная в виде отрицательного заряда частица *1* в центре системы и окруженная частицами с положительными зарядами *2* система частиц (рис. 9, *а*) образует среду как сумму вращающихся полей частиц с суммарной массой среды $1/r_{me} = \Sigma 1/r_{mi}$. Под влиянием симметричного окружения зарядами *2* система находится в равновесии. Если среда находится в равновесии, пробная частица не испытывает возмущений. Далее под влиянием флуктуаций возникает локальное нарушение симметрии при сдвиге заряда *2′* и тем самым нарушение равновесия всей системы (рис. 9, *б*). Происходит взаимодействие между отрицательным зарядом *1* и зарядом *2′* с нарушенным при флуктуации равновесием. Уберем симметрично расположенные положительные частицы *2* и рассмотрим систему из двух взаимодействующих друг с другом частиц *1* и *2′* (рис. 9, *в*). Введем радиус-вектор $r_{12дi}$, равный по модулю расстоянию между взаимодействующими частицами *1—2* (рис. 9, *г*).

Сочетание двух взаимодействий (близкодействия и дальнодействия) позволяет последовательно описывать формирование частиц. Передача взаимодействия происходит за временной промежуток $t_{де} = r_{де}/c_0$ [18, 19].

Теория близкодействия заключается в том, что всякое взаимодействие осуществляется посредством какого-то промежуточного звена (т.е. переносчика взаимодействия).

Теория дальнодействия (или теория действия на расстоянии), напротив, говорит о том, что всякое взаимодействие осуществляется мгновенно и через пустоту, т.е. действие со стороны любых тел может передаваться мгновенно на сколь угодно большие расстояния.

Поле электрона имеет отрицательную кривизну [8—11], поле протона (позитрона) — положительную, взаимодействие между зарядами подчиняется теории близкодействия [15—25]. Кроме того, положительные и отрицательные электрические поля имеют соответственно положительную кривизну типа "сфера Римана" и отрицательную кривизну геометрии типа "седло Лобачевского". Эти пространственные поля зеркально симметричны и обладают одинаковыми свойствами, их наложение приводит к формированию поля с прямоугольной геометрией Евклида (квазиевклидовой геометрией). При взаимодействии заряженных частиц возникают частицы (фотон, мюон, атом водорода) с полем нейтрального заряда типа гравитационного, которое соответствует теории дальнодействия [14—25]. Энергия электромагнитного взаимодействия больше в сравнении с гравитационным в $4{,}17 \cdot 10^{42}$ раз. Существует также ряд промежуточных по величине взаимодействий типа дисперсионных, ван-дер-ваальсовых, ионных и т.д. Геометрия взаимодействующих зарядов определяет силу взаимодействия.

Рассмотрим изменение квадрата импульса при движении частицы (см. рис. 7—9):

$$m_{e1}^2 c_c^2 = m_{e0}^2 c_c^2 + m_{ev1}^2 \mathrm{v}^2. \quad (8)$$

Тогда энергия электрона в среде E_e определяется как

$$E_e = m_e c_0^2 = \mu_0 q^2 c_0^2 / 4\pi r_{me}. \quad (9)$$

Общая энергия электрона в поле E_0 определяется как сумма потенциальной энергии электрона в среде E_e и кулоновской энергии возмущения пробной частицы электрическим зарядом:

$$E_0 = m_e c_0^2 + m_к c_0^2 = m_e c_0^2 + \mu_0 q^2 c_0^2 / 4\pi r_{mк}. \quad (10)$$

При расчете импульса частиц в системах отсчета 0 или 1 следует определить положение наблюдателя при измерении — c_c или c_{cv}. Параметры с индексами 0 относятся к покоящемуся электрону, с индексами 1 относятся к движущемуся со скоростью v.

Предполагая нахождение точки измерения в системе 0, скорость c_c будет одинакова в обеих системах отсчета, однако время t_{ev} в движущейся системе, согласно Лоренцу, замедляется. В случае предположения, что замедляется c_{cv} пропорционально скорости движения системы v время t_{ev} остается постоянным. Выбор параметров c_c или c_{cv} зависит от выбора системы отсчета (измерения), если система принята покоящейся (система 0), то применяется c_c. Если система принята движущейся со скоростью v (система 1), то используется c_c (движущаяся система 1) (см. рис. 7). Точное измерение c_{cv} при нахождении внутри движущейся системы отсчета невозможно в связи с изменением самих средств измерения. Как следует из теоремы Пифагора для евклидова пространства, выводом в результате измерений будет равенство c_c и c_{cv}. Волна вероятности де Бройля электрона $\lambda_{де}$. определена волновыми флуктуациями среды.

Существует постоянство угловой частоты световой волны вероятности (см. рис. 7—9), что соответствует постоянству угловой скорости света. Характеристики электрона постоянны и находятся в равновесии со средой, в которой он находится. Поведение электрона определяется свойствами среды.

Используем правило треугольника для расчета скорости

$$\boldsymbol{c}_c = \boldsymbol{c}_{cv} + \mathbf{v}_v, \quad (11)$$

где $\boldsymbol{c}_c$ — синусоидальная скорость света,

$\boldsymbol{c}_c = 4\pi c_0$;

c_0 — измеренная скорость света [18,19];

sb218.indd 87 02.02.2018 11:19:33

$\boldsymbol{c}_{cv}$ — скорость движения по радиусу $r_{дev}$;
$\mathbf{v}_v$ — скорость движения частицы.

В скалярном виде разложение вектора скорости c_c равно

$$c_c^2 = c_{cv}^2 + v_v^2. \quad (12)$$

Разложение скорости по правилу треугольника приводит к разложению движения частицы на круговое и линейное, суммарно в виде спирали с правым винтом при соответствующем соотношении β скоростей c_c и v_v, которое равно постоянной α (постоянная тонкой структуры) [2—11]. Такое соотношение наблюдается, например, в атоме водорода для скоростей c_0 и v_a.

Перейдем к рассмотрению системы подобных частиц. Электрон, движущийся с нарастанием скорости, приобретает свойства вихревой спирали (соленоида), изменение длины спирали пропорционально изменению скорости движения частицы. Тогда максимальная длина спирали при движении частицы со скоростью v_v вблизи скорости света c_c:

$$r_e' = 2\pi r_{де} = 2\lambda_{де}'. \quad (13)$$

Согласно принципу эквивалентности масс сжатие движущейся системы как следствие движения частиц подобно сжатию частицы под влиянием гравитационного поля. Сохраняется постоянство скорости света при сохранении плотности среды ρ. Векторный потенциал соленоидального векторного поля определяется неоднозначно.

Вихревые потоки частиц в диссипативных системах

Рассмотрим свойства векторных полей — вихревого и потенциального [29, 30]. Векторное поле называется соленоидальным или вихревым, если через любую замкнутую поверхность S его поток равен нулю. Потенциальное (или безвихревое) векторное поле можно представить как градиент некоторой скалярной функции координат. Общей причиной возникновения вихревых структур следует считать фазовый переход от потенциального векторного поля потоков осаждаемого вещества в вихревое при участии перекрестных потоков вещества [2—11, 26—28]. Такой фазовый переход можно представить двухфазным уравнением с превращением вещества из состояния B_x в состояние C_y:

$$L_n = A_в \left[(1 - \varepsilon_м) B_x + \varepsilon_м C_y \right]^{1/2}. \quad (14)$$

Например, при нанесении покрытий вакуумными ионно-плазменными методами возникает градиент плотности потока осаждаемых на подложку частиц вдоль поверхности подложки (см. рис. 5). При росте кристаллов обнаружено образование вихревых структур при росте ионно-плазменных покрытий.

На основе атомно-кластерной модели (АКМ) роста покрытий в вакууме изучена подвижность частиц на поверхности растущих покрытий под воздействием тепловых потоков [2—11, 26—28]. Потоки тепла возникают от частиц осаждаемого вещества и тепла от нагревателя с формированием перекрестного потока мигрирующих частиц, движущегося преимущественно по эквипотенциальным поверхностям растущего покрытия. В случае превышения тепловой энергии частиц потенциальных барьеров поверхности возможна поверхностная миграция (диффузия) частиц. В центре подложки плотность максимальна, по мере удаления на периферию плотность осаждаемого вещества уменьшается по закону косинуса [2—11]. Поступающий от катода (испарителя вещества) поток частиц при осаждении сначала движется по поверхности подложки в потенциальном поле с градиентом плотности от центра на периферию. Осажденная частица вступает в равновесие с подложкой и с перекрестным излучением фотона переходит в состояние вихревого поля с круговым движением. В результате фазового перехода радиальное движение частиц сменяется на круговое движение с образованием вихревого потока вещества. Явление образования перекрестных потоков вещества разной природы (например, потоков тепла и частиц вещества) довольно распространено в природе. Например, это происходит при излучении фотонов атомами вещества [10, 11].

Рассмотрим, например, реакцию превращения частиц $e^- + e^+ = 2\gamma$ в излучение (аннигиляцию) фотонов [10, 11]. Такая реакция взаимодействия электрон—позитрон с образованием перекрестных потоков фотонов показана на рис. 9. При соответствующих условиях возможно образование из фотона электрон-позитронной пары и, наоборот, при слиянии электрона и позитрона образование в зависимости от направления спина частицы двух или трех фотонов, разлетающихся в противоположных направлениях либо под углом 120° соответственно. Такая реакция взаимодействия электрон-позитронной пары приводит к возникновению двух (или трех) фотонов с энергией, равной энергии электрона и позитрона $e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$.

Предложенная АКМ роста связана с наличием на поверхности растущего покрытия двух фаз (конденсированной B_a и мигрирующей C_c) и возникающих вследствие этого нелинейных фазовых переходов в растущих слоях наносимых покрытий. Основным принципом модели является определение длины свободного пробега осаждаемых частиц l_0 по поверхности подложки:

sb218.indd 88 02.02.2018 11:19:33

$$l_0 = an^{1/2}, \quad (15)$$

где a — период решетки вещества;

n — число перескоков из одного адсорбционного центра в другой [8].

Потоки тепла определяют количество мигрирующей фазы, с ростом температуры увеличивается число мигрирующих частиц. Модель роста позволяет объяснить возникновение фазового перехода типа кристаллизации в диапазоне температур с формированием крупнокристаллического строения покрытий

$$L_n = A_в\left[(1-\varepsilon_м)B_a + \varepsilon_м C_c\right]^{1/2}, \quad (16)$$

где B_a — количество конденсированной фазы;

C_c — количество мигрирующей фазы;

$A_в$ — параметр, зависящий от свойств наносимого вещества;

$\varepsilon_м$ — число частиц с энергией, превышающей потенциальный барьер поверхности U_b,

$$\varepsilon_м = D\int_{U_b}^{U_r}\left(\frac{dN}{dv}\right)dT;$$

D — коэффициент пропорциональности;

U_r — энергия связи частицы с поверхностью.

Соотношением количества конденсированной B_a и мигрирующей C_c фаз выражается соотношение двух потоков вещества — скорости миграции и скорости роста монослоя.

Частицы на поверхности с энергией $U_b < E_T < U_r$ подчиняются максвелловскому распределению по скоростям dN/dv.

В случае отсутствия конденсированной фазы сохраняется только мигрирующая фаза

$$K_c = A_в(\varepsilon_м C_c)^{1/2}. \quad (17)$$

На поверхности покрытий просматриваются вихревые образования как следствие вихревого движения перекрестных потоков осаждаемого вещества в процессе нанесения покрытия (см. рис. 2—5). Следовательно, причиной образования вихревых структур кристаллов при нанесении ионно-плазменных покрытий, обнаруженных в работах [2—11, 26—28], является фазовый переход от потенциального векторного поля в вихревое поле потоков осаждаемого вещества на поверхностях растущих ионно-плазменных покрытий. Такой фазовый переход частицы из одного состояния в другое сопровождается перекрестным излучением фотонов с возникновением вихревого движения.

Высокотемпературная сверхпроводимость. Под высокотемпературными сверхпроводниками подразумевают сверхпроводники с критической температурой выше точки кипения азота (77 K или −196 °C). Рекордным значением критической температуры T_c = 135 K (под давлением: 165 K или −109 °C) обладает вещество $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+x}$. Среди простых химических соединений открыта сверхпроводимость диборида магния MgB_2 критической температурой 39 K, которую можно объяснить наличием в MgB_2 не одной энергетической щели, а двух [20, 21]. В сверхпроводящем дибориде магния присутствуют два сорта куперовских пар. Их взаимодействие обеспечивает высокую температуру сверхпроводимости. У каждого сорта электронных пар есть свой размер или своя длина когерентности. Каждой из двух энергетических щелей Δ_1 и Δ_2 соответствует своя длина когерентности ξ_1, ξ_2 и лондоновская глубина проникновения λ_1, λ_2. Если применить критерий Абрикосова для MgB_2, то для первой щели $k = \lambda_1/\xi_1 \approx 0{,}66 < 1/\sqrt{2}$, а для второй — $k = \lambda_2/\xi_2 \approx 3{,}68 > 1/\sqrt{2}$, т.е. одновременно существуют две сверхпроводимости — первого и второго рода. Кристаллическая структура этого вещества представляет собой чередующиеся слои бора и слои магния. Слоистость приводит к анизотропии физических свойств, т.е. электрическая проводимость, оптический спектр поглощения, прочность различны в плоскости слоев и в направлении, перпендикулярном к слоям.

В случае высокотемпературной сверхпроводимости происходит фазовый переход нормальных электронов в бозе-конденсат низкотемпературной сверхпроводящей фазы куперовских пар при росте температуры в отличие от низкотемпературной сверхпроводимости:

$$K_{всп} = A_в\left[(1-\varepsilon_b)B_{всп} + \varepsilon_f C_n\right]^{1/2}, \quad (18)$$

где ε_f — коэффициент распределения частиц по энергии Ферми—Дирака;

$B_{всп}$ — число частиц сверхпроводящей фазы Бозе;

ε_b — коэффициент распределения частиц по энергии Бозе—Эйнштейна;

C_n — число частиц нормальной проводящей электронной фазы (электронный газ);

$K_{всп}$ — электрическое сопротивление исследуемого вещества, растущее соответственно с ростом температуры T.

При определенной критической температуре сопротивление падает до нуля и возникает явление высокотемпературной сверхпроводимости.

Переменные параметры $B_{всп}$ и C_n относятся к единичным частицам, а состояние всей фазы определяет параметр ε_b (распределение Бозе—Эйнштейна). В предельном случае остается только сверхпроводящая бездиссипативная фаза и реализуется феномен высокотемпературной сверхпроводимости [2—10, 25—27]:

$$K_{всп} = A_в\left[(1-\varepsilon_f)B_{всп}\right]^{1/2}. \quad (19)$$

sb218.indd 89 02.02.2018 11:19:34

Тогда коэффициент подобия $K_{сп} = n_{сп}K_{всп}$, где $n_{сп}$ — коэффициент пропорциональности в случае высокотемпературной сверхпроводимости.

Исследованиями А.А. Абрикосова показано теоретически, что проникновение магнитного поля в сверхпроводник 2-го рода происходит в виде квантованных вихревых нитей и такая система энергетически выгодна. Вихревые структуры создают потоки спаренных частиц, движущихся без диссипации энергии.

Сверхнизкое трение (СНТ) обнаружено при исследовании слоистых веществ в высоком вакууме при энергетическом воздействии (высоких температурах, при облучении альфа-частицами или электронами). Сверхнизкое трение возникает при наличии в зоне трения атомно-гладких плоскостей (0001) с одинаковыми по величие и достаточно малыми потенциальными барьерами, равными тепловой энергии частиц [2—10, 25—27]. Бездиссипативное вихревое движение частиц на эквипотенциальных поверхностях [0001] обеспечивает СНТ. Энергия связи плоскостей (0001) в дихалькогенидах — ван-дер-ваальсова. Потоки частиц на поверхностях (0001) могут двигаться практически в отсутствие сил сопротивления без рассеяния энергии при нормальных условиях на воздухе.

Подобный феномен определяется зависимостью коэффициента скольжения $K_{снт}$ от соотношения количеств конденсированной $B_к$ и мигрирующей $C_{снт}$ фаз [2—11, 26—28]:

$$K_{снт} = A_в\left[\left(1-\varepsilon_м\right)B_к + \varepsilon_м C_{снт}\right]^{1/2}. \qquad (20)$$

В случае отсутствия конденсированной фазы сохраняется только мигрирующая фаза переноса вещества без диссипации энергии при отсутствии сил сопротивления

$$K_{снт} = A_в(\varepsilon_м C_{снт})^{1/2}. \qquad (21)$$

Перенос частиц возможен по эквипотенциальным поверхностям слоистого анизотропного твердого тела с особым изоэнергетическим уровнем энергетической щели выше уровня Ферми, где образуется соответствующая энергетическая щель. При этом частицы (атомов или молекул) должны иметь на внешних оболочках спаренные электроны с целочисленным спином и заполненными внешними электронными оболочками. Подобное состояние частиц обеспечивает отсутствие взаимодействия частиц между собой и позволяет перемещать поток вещества по эквипотенциальным поверхностям энергетической щели в процессе трения.

В пространствах Ван-дер-Ваальса реализуется дальнодействующее дисперсионное взаимодействие ван-дер-ваальсовых сил, и нет свободных валентных электронов, способных образовывать сильные обменные взаимодействия. Легирование дихалькогенидов приводит к увеличению расстояния между слоями при размещении легирующих атомов в межпакетных пространствах и уменьшает энергию взаимодействия Ван-дер-Ваальса практически на порядок. Тем самым возникает возможность перемещения потоков частиц без диссипации (рассеяния) энергии по эквипотенциальным поверхностям. Диссипативные процессы рассеяния энергии являются следствием действия сил сопротивления, возникающих при обменных процессах перемещения частиц и сопровождающихся излучением фотонов. Взаимодействия между пакетами X—M—X (X — халькоген, M — металл) дихалькогенида имеют дисперсионную природу, в основе которых лежат диполи, образующиеся под действием коллективных фононных колебаний атомов внутри пакета X—M—X. Такие колебания вызывают аддитивно связанные фононные колебания с поляризацией противоположного знака в соседнем пакете. Именно слоистые вещества обладают выраженной анизотропией свойств, что проявляется в возможности существенных аномалий электромагнитных и физико-механических характеристик, не наблюдаемых у других веществ.

Атмосферные вихри, возникающие как совокупность воздушных течений в атмосфере над земной поверхностью, подобны рассмотренным выше вихревым явлениям. Причина появления вихревых структур — процессы диффузии частиц под влиянием перекрестных потоков тепла и вещества. Согласно принципу взаимности, влияние потока тепла на поток вещества должно соответствовать влиянию потока вещества на поток тепла [12]. Движение вещества соответствует принципу минимума диссипации энергии, поэтому потоки частиц перемещаются по энергетически выгодным поверхностям атмосферных структур. Тем самым происходит самоорганизация системы частиц в атмосфере, которая должна быть открытой по отношению к окружающей среде и стремиться к неразрывности [12, 13].

Из анализа результатов проведенных исследований следует подобие явлений, в основе которых лежит вихревая природа частиц, формирующих Периодическую систему элементов. Причина возникновения вихревого движения частиц — фазовый переход частицы из одного состояния в другое с перекрестным излучением фотонов. В природе отсутствует идеально прямолинейное движение, в реальном мире геометрия является неевклидовой. Реальная геометрия Земли и Солнечной системы является сферической. Поэтому в связи с отсутствием прямолинейной геометрии потоки

sb218.indd 90 02.02.2018 11:19:34

вещества (атомов или молекул воды, атмосферы) на земной поверхности совершают сложное вихревое движение по криволинейным линиям. Вихревые потоки, на первый взгляд, различных физических процессов являются подобными.

Выводы

При нанесении ионно-плазменных покрытий экспериментально обнаружен нелинейный фазовый переход в диапазоне температур от аморфной к кристаллической структуре.

Предложена атомно-кластерная модель роста покрытий в вакууме, основанная на взаимодействии перекрестных потоков тепла и вещества.

Исследовано явление вихревого переноса частиц без диссипации энергии вдоль эквипотенциальных поверхностей, имеющее квантово-механическую природу.

Сверхнизкое трение, сверхпроводимость, рост кристаллов в вакууме основаны на вихревых бездиссипативных потоках вещества.

Причиной вихревого движения частиц при различных физических процессах является фазовый переход частицы из одного состояния в другое с перекрестным излучением фотонов.

Осуществление движения вещества без диссипации энергии возможно по эквипотенциальным поверхностям слоистого твердого тела с особыми изоэнергетическими уровнями выше уровня Ферми, где образуется соответствующая энергетическая щель.

Квантовые потоки при росте кристаллов имеют вид вихревых сверхструктур, взаимосвязанных с основной кристаллической структурой системы.

Нанесение легированных композиционных покрытий приводит к сверхнизкому трению при нормальных условиях на воздухе и к повышению долговечности покрытия в несколько раз.

Библиографический список

1. **Булаевский Л.Н.** Сверхпроводимость и электронные свойства слоистых соединений // УФН. 1975. Т. 116. С. 449.
2. **Ноженков М.В., Авилов А.С., Семенов А.П., Семилетов С.А.** Структура покрытий MoS_2, образующихся при вакуумном ионно-плазменном нанесении // Поверхность. 1987. № 9. С. 148—149.
3. **Ноженков М.В.** Оборудование для нанесения износостойких антифрикционных композиций // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2013. № 8. С. 20—28.
4. **Ноженков М.В.** Влияние структуры на сверхнизкое трение покрытий, нанесенных ионным распылением // Поверхность. 2015. № 5. С. 100—112.
5. **Ноженков М.В.** Структура и свойства вакуумных ионно-плазменных покрытий // Поверхность. 2014. № 1. С. 54—63.
6. **Nozhenkov M.V.** The ultra-low friction of layer structures // Mechanical Engineering Research. 2013. V. 3. N 2. P. 73—90.
7. **Nozhenkov M.V.** Superlow interaction in layered structures // Global Journal of Researches In Engineering. 2014. V. 14-A. Iss. 2. P. 55—61.
8. **Ноженков М.В.** О слабых взаимодействиях частиц в твердых телах // Наноинженерия. 2012. № 3 (9). С. 41—47.
9. **Ноженков М.В.** Кристаллическая структура и свойства покрытий, наносимых вакуумными ионно-плазменными методами // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 9. С. 38—48.
10. **Ноженков М.В.** Потоки подобных частиц без диссипации энергии // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 5—6. С. 38—48.
11. **Ноженков М.В.** Квантовые потоки как вихревые сверхструктуры // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. № 3. С. 132—144.
12. **Onsager L.** Reciprocal relations in irreversible processes // Phys. Rev. 1931. Vol. 37. P. 405—426.
13. **Пригожин И., Кондепуди Д.** Современная термодинамика. М.: Мир, 2002. 461 с.
14. **Эйнштейн А.** Теория относительности. Ижевск: НИЦ РХД, 2000. 224 с.
15. **Дирак П.А.М.** Релятивистское волновое уравнение электрона // Успехи физических наук. 1979. Т. 129. Вып. 4. С. 681—691.
16. **Савельев И.В.** Курс общей физики. М.: Астрель, 2008. Т. 2. 336 с.
17. **Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.** Фейнмановские лекции по физике. М.: Мир, 1976. 440 с.
18. **Каршенбойм С.Г.** Фундаментальные физические константы: роль в физике и метрологии и рекомендованные значения // УФН. 2005. Т. 175. С. 271—298.
19. **Каршенбойм С.Г.** Прогресс в уточнении фундаментальных физических констант: рекомендованные значения КОДАТА 2010 // УФН. 2013. Т. 183. С. 935—968.
20. **Babaev E., Speight M.** Semi-Meissner state and neither type-I nor type-II superconductivity in multicomponent superconductors // Phys. Rev. B 72, 180502(R) (2005).
21. **Moshchalkov V., Menghini M., Nishio T.** Type-1.5 Superconductivity // Phys. Rev. Lett. 102, 117001 (2009).
22. **Веников В.А., Веников Г.В.** Теория подобия и моделирования. М.: Высшая школа, 1984. 439 с.
23. **Шалимова К.В.** Физика полупроводников. СПб.: Лань, 2010. 400 с.
24. **Зи С.** Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. Т. 1. 456 с.
25. **Ахиезер А.И., Берестецкий В.Б.** Квантовая электродинамика. М.: Наука, 1981. 428 с.
26. **Ноженков М.В.** Бездиссипативные потоки вещества в конденсированных средах // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 2. С. 20—31.
27. **Ноженков М.В.** Бездиссипативные потоки вещества в конденсированных средах // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 3. С. 14—17.
28. **Ноженков М.В.** Влияние структуры на создание бездиссипативных потоков в конденсированных средах // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 4. С. 16—32.
29. **Седов Л.И.** Механика сплошной среды. М.: Наука, 1994. 492 с.
30. **Лаврентьев М.А., Шабат Б.В.** Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1973. 416 с.

sb218.indd 91 02.02.2018 11:19:34

УДК 621.778

Г.Н. Гурьянов, *канд. техн. наук (ОАО "НИИМетиз", г. Магнитогорск),*
С.И. Платов, Н.Н. Огарков, *д-ра техн. наук,* **Е.С. Шеметова**
(МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск)
E-mail: ggnbelorhome@rambler.ru

Запрессовка рабочего вкладыша инструмента как способ повышения его прочности при волочении проволоки

Выполнен расчет радиальной силы, действующей на волоку, и средней величины наибольшего касательного напряжения на внутренней поверхности вкладыша в зависимости от основных параметров деформации. Наибольшее касательное напряжение на внутренней поверхности вкладыша больше радиального напряжения, что способствует переходу материала в пластическое состояние и повышает вероятность его разрушения. От запрессовки рабочего вкладыша повышается его прочность при волочении проволоки. Дано обоснование целесообразности волочения с противонатяжением для снижения радиальной силы на рабочий вкладыш волоки.

The calculation of the radial force on the die and the average value of the maximum tangential stress on the inner surface of the liner are performed, depending on the basic strain parameters. The greatest tangential stress on the inner surface of the insert is greater than the radial stress, which facilitates the transition of the material to a plastic state and increases the probability of its destruction. From the insertion of the working insert, its strength increases when drawing the wire. The justification of the expediency of dragging with anti-tension is given to reduce the radial force on the working insert of the machine.

Ключевые слова: волочение, проволока, рабочий вкладыш волоки, прочность, разрушение, радиальное напряжение, наибольшее касательное напряжение, износ деформирующей поверхности.

Keywords: drawing, wire, work dies, strength, fracture, radial stress, maximum tangential stress, wear of the deforming surface.

Эксплуатационная стойкость волочильного инструмента определяется различными свойствами материала рабочего вкладыша: прочностью, износостойкостью, пластичностью, теплостойкостью, сопротивлением усталостным и коррозионным процессам и т.п. [1—6]. Высокие механические нагрузки на твердосплавный вкладыш волоки могут вызвать его раскол в плоскости, проходящей через ось волочения. Для снижения вероятности раскола рабочего вкладыша применяют его запрессовку в цилиндрическую обойму (одинарная волока) или коническую разрезную втулку (сборный инструмент с напорным и рабочим вкладышами).

Цель работы — показать зависимость напряженного состояния рабочего вкладыша волоки от основных параметров деформации проволочной заготовки при отсутствии и при наличии запрессовки вкладыша.

Радиальную силу на рабочий конус рассчитывали по формуле [5]:

$$P_к = \int_S (\sigma_{si} - \sigma_{zi})\, dS, \qquad (1)$$

где σ_{si}, σ_{zi} — текущие предел текучести и осевое напряжение в конусе;

S — площадь контакта, зависящая от сечения заготовки и величины деформации.

В уравнении (1) разность в скобках выражает абсолютное значение радиального напряжения.

Зависимость предела текучести обрабатываемого металла от вытяжки μ приняли в виде степенной функции [5]:

$$\sigma_{si} = \sigma_{s0}\mu^k, \qquad (2)$$

где σ_{s0} — предел текучести металла на входе рабочего конуса волоки;

sb218.indd 92 02.02.2018 11:19:34

k — коэффициент упрочнения;

μ — коэффициент вытяжки, $\mu = (r_0/r_k)^2$;

r_0, r_k — радиус заготовки до и после деформации.

Формула (3) удовлетворительно описывает упрочнение стальной патентированной заготовки при холодном волочении проволоки.

Вдоль очага деформации меняются значения предела текучести, осевого и радиального напряжений, что необходимо учитывать при определении радиальной силы (1). В этом случае при законе упрочнения (2) расчет прироста осевого напряжения в рабочем конусе волоки целесообразно выполнять по формуле [7]:

$$\sigma_{z1} = \frac{\sigma_{s0}}{k}\left(\mu^k - 1\right)\left(1 + f\,\mathrm{ctg}\,\alpha\right), \qquad (3)$$

где f — коэффициент трения;

α — угол наклона образующей рабочего конуса к оси волочения.

Текущее осевое напряжение в конусе σ_{zi} рассчитывали с учетом действия напряжения противонатяжения σ_{q0}, приложенного к входящему концу заготовки. Прирост напряжения от действия противонатяжения [5]:

$$\sigma_{z2} = \sigma_{q0}\Big/\mu^{f\,\mathrm{ctg}\,\alpha}.$$

Среднее радиальное напряжение, действующее на внутреннюю поверхность вкладыша, определяли из равенства

$$\sigma_r = P_к/S, \qquad (4)$$

где $P_к$ — радиальная сила на рабочий конус;

S — площадь действия радиального напряжения.

Для расчета выбран рабочий вкладыш, изготовленный из заготовки по ГОСТ 9453—75, с формой 10, которая используется для волочения проволоки диаметром 1,5...6,2 мм [4]. Наружный диаметр твердосплавной заготовки равен 22 мм. Приняли, что радиальная сила на вкладыш с поперечным кольцевым сечением, переменным вдоль оси волочения, распределилась равномерно по внутренней цилиндрической поверхности с приведенными диаметром 4,2 и длиной 9 мм (рис. 1). В этом случае $S = 118{,}75$ мм^2.

Замена вкладыша гипотетическим равнопрочным цилиндром позволила использовать известное решение по определению напряженного состояния толстостенного цилиндра под действием внутреннего давления [8].

Рассчитали величину разности тангенциального σ_θ и радиального σ_r напряжений на

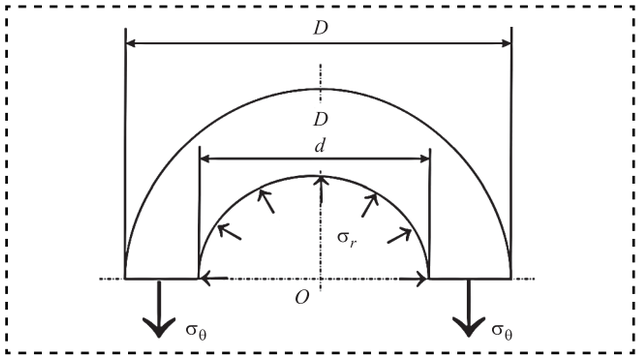

Рис. 1. Схема к расчету напряженного состояния рабочего вкладыша волоки:

σ_r — радиальное напряжение на внутреннюю поверхность; σ_θ — тангенциальное напряжение в продольном сечении вкладыша: D = 22 мм — наружный диаметр; d = 4,2 мм — приведенный внутренний диаметр

внутренней поверхности рабочего вкладыша, которая максимальна именно в этом месте [8]:

$$\sigma_\theta - \sigma_r = \tau = \frac{2D^2\sigma_r}{D^2 - d^2}, \qquad (5)$$

где σ_r — среднее радиальное напряжение по формуле (1);

D, d — наружный и приведенный внутренний диаметр вкладыша соответственно (см. рис. 1).

Диаметр проволоки после обжатия принят равным приведенному диаметру d = 4,2 мм. Сопоставимость прочности реального вкладыша и гипотетического цилиндра обеспечена укороченной длиной последнего 9 мм в сравнении с фактической длиной 22 мм твердосплавной заготовки формы 10.

Разность напряжений из выражения (5) по третьей теории прочности определяет наибольшее касательное напряжение τ. Когда величина разности достигнет предела текучести материала вкладыша, появится пластическая деформация внутреннего поверхностного слоя. Разность $\sigma_\theta - \sigma_r$ по абсолютной величине всегда больше радиального напряжения на внутренней поверхности вкладыша.

На рис. 2 построены зависимости радиальной силы на рабочий вкладыш $P_к$ (рис. 2, *а*, *в*) и наибольшего касательного напряжения (рис. 2, *б*, *г*) от коэффициента вытяжки и угла α наклона образующей рабочего конуса при исходном пределе текучести σ_{s0} = 1000 МПа и коэффициентах упрочнения k = 0,25 и трения 0,025 и 0,075. Расчет выполнен при отсутствии противонатяжения.

Данные рис. 2, *а*, *в* показывают, что с уменьшением угла α и коэффициента трения и увеличением коэффициента вытяжки значительно

sb218.indd 93 02.02.2018 11:19:34

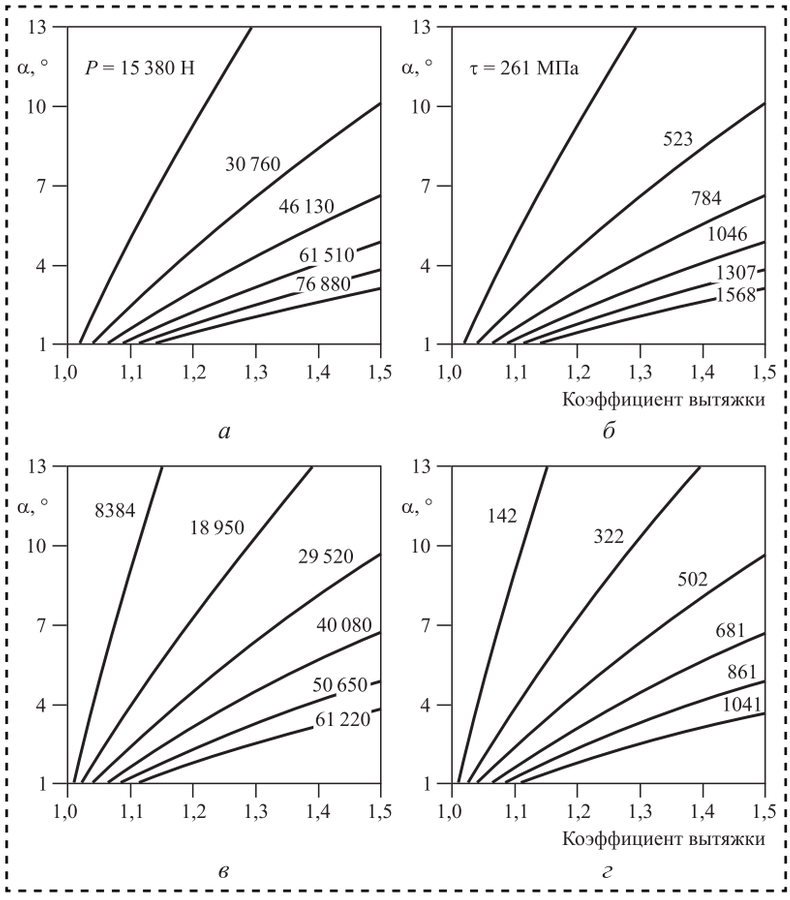

Рис. 2. Зависимость радиальной силы на волоку (*а*, *в*) и наибольшего касательного напряжения (*б*, *г*) от коэффициента вытяжки и угла α при отсутствии противонатяжения и σ_{s0} = 1000 МПа:
а, *б* — f = 0,025; *в*, *г* — f = 0,075

возрастает радиальная сила на волоку, что приводит к соответствующему росту наибольшего касательного напряжения τ (рис. 2, *б*, *г*).

Зависимости наибольшего касательного напряжения на рис. 3 определены при σ_{s0} = 1500 МПа и том же коэффициенте упрочнения и коэффициенте трения 0,025. Напряжение противонатяжения 0 и 300 МПа. Противонатяжение привело к снижению радиальной силы, особенно при малых углах α. Сравнение рис. 2, *б* и рис. 3, *а* позволяет сделать вывод, что увеличение σ_{s0} в полтора раза привело к такому же росту касательного напряжения.

Зависимости наибольшего касательного напряжения из выражения (5) построены по среднему значению радиального напряжения по формуле (4). Если радиальное напряжение равно 1000 и 1500 МПа, то наибольшие касательные напряжения соответственно составили бы 2076 и 3114 МПа, что превышает предел прочности при изгибе, например, сплава ВК6, равного 1590 МПа [9]. Но такое радиальное напряжение испытывает материал вкладыша на входе в очаг пластической деформации заготовки при ее исходном пределе текучести σ_{s0} = 1000 и 1500 МПа. В этом случае пластическая деформация с внутренней поверхности распространяется на вышележащие слои материала вкладыша. Таким образом, на входе очага деформации создается неблагоприятное напряженное состояние, способствующее переходу материала в пластическое состояние. Это усиливает вероятность разрушения материала вкладыша.

Интенсивный износ материала вкладыша в начале контакта с обрабатываемым металлом частично объясняется микроразрушением относительно хрупкого материала вкладыша в малой области, которая становится центром формирования кольцевой канавки. Кольцевая выработка рабочей поверхности вкладыша — источник появления на поверхности проволоки рисок, царапин и задиров и основная причина выхода из строя волочильного инструмента [3, 4].

Образование "кольцевого" износа вызвано высоким радиальным напряжением в поверхностных слоях вкладыша на входе очага

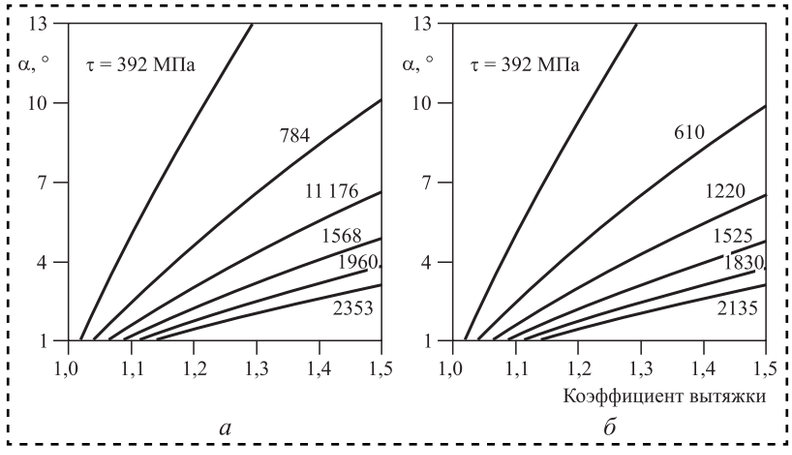

Рис. 3. Зависимость наибольшего касательного напряжения от коэффициента вытяжки и угла α при отсутствии противонатяжения (*а*) и напряжении противонатяжения 300 МПа (*б*):
f = 0,025; σ_{s0} = 1500 МПа

sb218.indd 94 02.02.2018 11:19:34

пластической деформации заготовки. Из-за радиального напряжения σ_r на входе возникает значительное касательное напряжение на поверхности вкладыша $\sigma_\theta - \sigma_r$, которое стремится перевести материал в пластическое состояние. Переменный характер этого напряжения, вызванный непостоянством прочностных свойств протягиваемой заготовки, ее поперечного сечения, условий контактного трения и напряжения противонатяжения, способствует образованию и развитию процесса усталостного разрушения материала вкладыша [3, 6, 10].

Если на внешней поверхности вкладыша будет действовать начальное сжимающее напряжение p за счет его запрессовки в стальную обойму, то разность тангенциального и радиального напряжений на его внутренней поверхности определится по формуле [8]:

$$\sigma_\theta - \sigma_r = \tau = \frac{2D^2(\sigma_r - p)}{D^2 - d^2}. \qquad (6)$$

При $p = 400$ МПа, $\sigma_r = 1000$ и 1500 МПа наибольшее касательное напряжение τ соответственно равно 1245 и 2283 МПа. Приложение внешнего давления к наружной поверхности вкладыша величиной 400 МПа привело к снижению наибольшего касательного напряжения τ на внутренней поверхности соответственно до 831 и 1831 МПа, т.е. напряжение уменьшилось на 40,0 и 26,7 %. Отсюда следует необходимость качественного выполнения запрессовки рабочего вкладыша.

Если значение левой части уравнений (5) и (6) приравнять к предельному значению, то можно рассчитать давление на внутренней поверхности вкладыша, при котором достигается пластическое состояние материала. Пусть предельная величина наибольшего касательного напряжения равна 1590 МПа. При отсутствии давления на его внешней поверхности пластическое состояние материала на внутренней стороне наступает при среднем радиальном напряжении $\sigma_r = 766$ МПа и при $\sigma_r = 1166$ МПа, когда действует давление $p = 400$ МПа.

Достижение пластического состояния материала на внутренней поверхности вкладыша не вызывает его разрушения. Разрушение наступит, когда все сечение вкладыша будет находиться в пластическом состоянии. Предельное радиальное напряжение на внутренней поверхности вкладыша [8]:

$$\sigma_r - p = \frac{[\sigma_\theta - \sigma]_{\text{пред}}(D^2 - d^2)}{2d^2}.$$

Чтобы наступило пластическое состояние внешней поверхности вкладыша при $[\sigma_\theta - \sigma]_{\text{пред}} = 1590$ МПа, отсутствии давления $p = 0$ и давлении $p = 400$ МПа, радиальное напряжение σ_r на его внутренней поверхности должно быть соответственно 21 018 и 21 418 МПа. Таким образом, предельное радиальное напряжение на внутренней поверхности вкладыша на порядок больше предельной величины наибольшего касательного напряжения его материала. Однако необходимо учитывать, что материал вкладыша не является равнопрочным по всему объему. Кроме того, в результате износа на внутренней поверхности вкладыша образуются также продольные риски, бороздки на всю длину рабочей поверхности [3], которые являются значительными концентраторами напряжений для относительно хрупкого материала волок. Поэтому не исключается возможность разрушения вкладыша волоки под действием радиальной силы от деформируемого металла заготовки. С уменьшением контактного трения значительно повышается радиальная сила на рабочий вкладыш волоки [11, 12]. При волочении в режиме гидродинамического трения создается дополнительная радиальная нагрузка на волоку [13, 14]. В этом случае необходима качественная запрессовка рабочего вкладыша волоки, а также целесообразно применять противонатяжение при волочении проволоки [4, 15].

Выводы

Выполнен расчет радиальной силы на волоку и средней величины наибольшего касательного напряжения на внутренней поверхности вкладыша в зависимости от основных параметров деформации. С уменьшением коэффициента трения и угла наклона образующей рабочего канала волоки, увеличением коэффициента вытяжки значительно возрастает радиальная сила на волоку.

Наибольшее касательное напряжение на внутренней поверхности вкладыша больше радиального напряжения, что способствует переходу материала в пластическое состояние и повышает вероятность его разрушения. Основная причина образования кольцевой канавки на входе рабочего канала волоки — значительное растягивающее тангенциальное напряжение и наибольшее касательное напряжение на внутренней поверхности вкладыша.

Сжимающее напряжение на внешней поверхности вкладыша от его запрессовки в стальную обойму существенно снижает наибольшее

sb218.indd 95 02.02.2018 11:19:34

касательное напряжение на внутренней поверхности. Для перехода в пластическое состояние материала всего объема вкладыша необходимо приложить значительно большее радиальное напряжение на его внутренней поверхности, чем для перевода в такое состояние только поверхностного слоя, контактируемого с деформируемым металлом.

Отечественный сборный инструмент конструкции Орлова—Колмогорова для волочения проволоки в режиме гидродинамического трения не обеспечивает стабильных радиальных сжимающих напряжений на внешней поверхности рабочей и напорной волок [16]. Поэтому волочение с противонатяжением снизит проявление недостаточно качественной запрессовки рабочей и напорной волок.

Библиографический список

1. **Колмогоров В.Л.** Механика обработки металлов давлением: учебник для вузов. Екатеринбург: Изд-во УГТУ—УПИ, 2001. 836 с.
2. **Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В.** Ресурс пластичности металлов при обработке металлов давлением. М.: Металлургия, 1984. 144 с.
3. **Гурьянова М.К.** Виды износа и стойкость волок // Труды конференции по метизному производству. Челябинск: Изд. ЦБТИ Челябинского совнархоза, 1961. С. 158—166.
4. **Хаяк Г.С.** Инструмент для волочения проволоки. М.: Металлургия, 1974. 128 с.
5. **Гурьянов Г.Н.** Расчет, анализ напряжений, деформаций и запаса прочности при холодном волочении проволоки. Магнитогорск: МГТУ. 2008. 358 с.
6. **Сачава Д.Г., Ананьева С.В.** Классификация, причины возникновения, способы предотвращения износа и разрушения волочильного инструмента // Сталь. 2007. № 3. С. 75—76.
7. **Гурьянов Г.Н.** Составляющие полного осевого напряжения и оптимальные углы рабочего конуса волоки при волочении проволоки // Черные металлы. 2007. № 12. С. 18—22.
8. **Беляев Н.М.** Сопротивление материалов. М.: Наука, 1965. 856 с.
9. **Общетехнический** справочник / Е.А. Скороходов и др.; под общ. ред. Е.А. Скороходова. М.: Машиностроение, 1990. 496 с.
10. **Гурьянов Г.Н.** Факторы усталостного износа рабочего канала волочильного инструмента // Механическое оборудование металлургических заводов: междунар. сб. науч. тр. / под ред. Корчунова А.Г. Вып. 2. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. С. 44—52.
11. **Гурьянов Г.Н.** Радиальная сила на волоку в зависимости от способа учета упрочнения металла и основных параметров деформации проволоки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 11. С. 7—11.
12. **Гурьянов Г.Н.** Оценка параметров волочения при разных моделях упрочнения проволочной заготовки // Сталь. 2014. № 7. С. 71—77.
13. **Колмогоров В.Л., Орлов С.И., Колмогоров Г.Л.** Гидродинамическая подача смазки. М.: Металлургия, 1975. 256 с.
14. **Гурьянов Г.Н.** Основные показатели режима гидродинамического трения при волочении круглого сплошного профиля // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 4. С. 39—47.
15. **Гурьянов Г.Н.** Оценка эффективности применения противонатяжения для разгрузки волоки от радиальной силы // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015, Т. 81. № 3. С. 59—60.
16. **Гурьянов Г.Н., Зуев Б.М.** Направления в совершенствовании конструкций инструмента для волочения проволоки в режиме гидродинамического трения // Современные методы конструирования и технологии металлургического машиностроения: междунар. сб. науч. тр. / под ред. Н.Н. Огаркова. Магнитогорск: МГТУ им. Г.Н. Носова, 2016. С. 57—67.

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".
Адрес электронной почты издательства: **mashpubl@mashin.ru**;
редакции журнала: **sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru.**
Телефон редакции журнала: 8 (499) 269-54-98, 269-54-96.
Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 11.12.2017. Подписано в печать 01.02.2018. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз". Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.

sb218.indd 96 02.02.2018 11:19:34