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

6 2016 (191)

СОДЕРЖАНИЕ

Технологичность конструкции

Вавилов В.Е. Новые технические решения для создания сверхвысокооборотных электромеханических преобразователей энергии 3

Сборочное оборудование и его элементы

Черняховская Л.Б. Влияние вращательного движения вала на процесс автоматической сборки цилиндрических деталей 7

Сборочно-сварочные работы. Пайка

Бохоров И.О., Карабанов В.В. Пайка трубопроводных систем 14

Трение и смазка в машинах и механизмах

Ноженков М.В. Потоки подобных частиц без диссипации энергии 23

В помощь конструктору, технологу

Боброва Ю.С., Андроник М., Жуков В.В., Тахаутдинов Р.Ш., Бычков С.П. Низкотемпературное термокомпрессионное сращивание меди в технологии изготовления высокоплотных микросистем 34

Крынина Т.А. Разработка программного обеспечения для автоматизированного проектирования схвата робота-манипулятора 41

Шишкарев М.П. Влияние погрешностей изготовления и сборки адаптивных фрикционных муфт на их технические характеристики 44

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогу "Роспечать" — **79748**, Объединенному каталогу "Пресса России" — **84967**, каталогу "Почта России" — **60257**) или непосредственно в издательстве

Тел.: 8 (499) 269-54-98. Факс 8 (499) 269-48-97

E-mail: sborka@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

Ф.М. МИТЕНКОВ, *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.
А.В. МЕДАРЬ, д.т.н.
Е.А. МИКРИН, д.т.н., акад. РАН
Б.В. ШАНДРОВ, к.т.н., проф.
А.А. ШАТИЛОВ, к.т.н., доц.
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, д.т.н., чл.-кор. РАН
А.А. СУПОНЯ, к.т.н.

ВОЛГОГРАД

В.Г. КАРАБАНЬ, к.т.н., доц.
М.Г. КРИСТАЛЬ, д.т.н., проф.
В.И. ЛЫСАК, д.т.н., проф., чл.-кор. 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.

ОМСК

В.Н. КОСТЮКОВ, д.т.н.

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

В.И. КОЛЕСНИКОВ, акад. РАН и РИА (зам. гл. редактора)
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 Министерстве связи и массовых коммуникаций РФ. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-63953 от 09.12.2015 г.

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Сборка в машиностроении, приборостроении", 2016

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

6 2016 (191)

CONTENTS

Manufacturability of a construction

Vavilov V.E. New technical solutions for the creation of high-speed electromechanical transducer super energy 3

Production tools and machinery for assembly

Chernyahovskaya L.B. Influence of rotational movement of a peg on the automatic peg-in-hole assembly of cylindrical details 7

Assembly welding works. Soldering

Bokhorov I.O., Karabanov V.V. Soldering water systems 14

Friction & lubrication

Nozhenkov M.V. Flows of similarity particles without energy dissipation 23

Industrial and design engineer's aid

Bobrova Yu.S., Andronik M., Zhukov V.V., Takhautdinov R.Sh., Bychkov S.P. Low temperature copper thermocompression bonding for high density microsystems 34

Krynina T.A. Software development for computer aided design grab robot-rocker . . 41

Shishkarev M.P. The influence of manufacturing errors of the parts of adaptive friction couplings on their technical characteristics. 44

Journal is distributed on subscription, whith can be issues in any post office (index on the catalogue of the "Rospechat" agency — **79748**, the union catalogue "Pressa Rossii" — **84967**, the catalogue "Pochta Rossii" — **60257**) or directly in editorial of the journal.
Ph.: 8 (499) 269-54-98. Fax: 8 (499) 269-48-97.
http://www. mashin.ru E-mail: sborka@machin.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
F.M. MITENKOV

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
A.V. MEDAR'
E.A. MIKRIN
B.V. SHANDROV
A.A. SHATILOV
A.G. KHOLODKOVA

Regional editors

BELGOROD
N.A. PELIPENKO

BRIANSK
O.A. GORLENKO

VLADIVOSTOK
Yu.N. KULSHIN
A.A. SUPONIA

VOLGOGRAD
V.G. KARABAN'
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

OMSK
V.N. KOSTYUKOV

OREL
Yu.S. STEPANOV
G.A. KHARLAMOV

ORENBURG
A.N. POLYAKOV
A.I. SERDUK
A.P. FOT

PERM
S.M. BELOBORODOV
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 Ministry of Telecom and Mass Communications of RF.
Registration certificate ПИ № ФС 77-63953. 09.12.2015

© "Innovative Mashinostroenie" Publishers, "Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making", 2016

УДК 621.313

В.Е. Вавилов
(Уфимский государственный авиационный технический университет)
E-mail: s2_88@mail.ru

Новые технические решения для создания сверхвысокооборотных электромеханических преобразователей энергии

Рассмотрены сверхвысокоскоростные электромеханические преобразователи энергии с частотой вращения ротора до 800 000 мин$^{-1}$. Разработаны методы повышения эффективности работы сверхвысокооборотных ЭМПЭ. Предложено использование комбинации пассивных магнитных подшипников, установленных со смещением совместно с механическими подшипниками, обеспечивающими крепление ротора в осевом направлении. При этом смещение магнитных колец в магнитомеханических подшипниках необходимо для создания дополнительной аксиальной силы, которая будет разгружать механические аксиальные подшипники. Предлагается применение беспазовой обмотки кольцевого типа со скосом для снижения пульсационных потерь в бандажной оболочке ротора. Для снижения аэродинамических потерь ротора предлагается использовать антифрикционное покрытие, нанесенное на бандажную оболочку.

Ultra-high-speed electromechanical energy converters with a rotor speed of 800 000 min^{-1}. Methods have been developed to address the effectiveness EMPE. In particular the proposal to use a combination of passive magnetic bearings mounted offset together with mechanical bearings for mounting the rotor in the axial direction. This shift in the magnetic rings magnetomechanical bearings needed to create additional axial force, which will unload the mechanical axial bearings. It is also proposed the use of a ring-type coil slotless located bevel. This will reduce pulsation loss, and a rotor shroud and casing to create an additional axial force, which can also be used for additional mechanical unloading of axial bearings. In addition, to reduce the aerodynamic losses of the rotor is proposed to use a friction reducing coating on the bandage shell.

Ключевые слова: сверхвысокооборотные электромеханические преобразователи энергии, магнитомеханические подшипники, высококоэрцитивные постоянные магниты.

Keywords: ultra-high-speed electromechanical energy converters, magnetomechanical bearings, high-coercivity permanent magnets.

Развитие робототехники, станкостроения, а также разработка беспилотных летательных аппаратов нового поколения требуют создания сверхвысокооборотных электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ) (Super High Speed Electrical Machine, или Ultra-High Speed Electrical Machine по зарубежной терминологии) с частотами вращения ротора до 1 000 000 мин$^{-1}$ и мощностью от 50 Вт до 1 кВт [1].

Основное преимущество данного типа ЭМПЭ — высокая плотность энергии при миниатюрных габаритных размерах (диаметр ротора не превышает 10 мм), что обусловливает широкие перспективы применения их в микросистемах различного назначения. Также значительным преимуществом сверхвысокооборотных ЭМПЭ является уникальность решаемых ими задач.

Высокая частота вращения ротора сверхвысокооборотных ЭМПЭ приводит к значительному увеличению в них потерь, которые при малой мощности ЭМПЭ могут привести к снижению КПД.

Для решения задачи исследования методов максимального повышения КПД сверхвысо-

кооборотных ЭМПЭ обычно используют беспазовый статор, выполненный из аморфного железа, что позволяет упростить технологию изготовления таких статоров (лента из аморфного железа наматывается на стержень с определенным натягом) и обеспечивает минимизацию потерь энергии на гистерезис и вихревые токи. Кроме того, применение беспазового статора исключает потери, обусловленные зубчатостью. Для снижения потерь в проводниках обмотки от эффекта близости и вихревых токов применяют лицендрат с диаметром провода несколько микрон [2—5].

Данный тип ЭМПЭ, ввиду высокой частоты выходного напряжения, работает на выпрямитель (рис. 1). Это обусловливает дополнительные пульсационные потери в бандажной оболочке ротора, которые необходимо учитывать и снижать на стадии проектирования сверхвысокооборотных ЭМПЭ. При проектировании сверхвысокооборотных ЭМПЭ обычно применяют высокоскоростные механические подшипники с частотой вращения до 500 000 мин$^{-1}$. Недостатком данных подшипников является необходимость их смазывания, невысокий ресурс и потери на трение, что также приводит к снижению КПД всего ЭМПЭ. Применение электромагнитных подшипников в сверхвысокооборотных микроЭМПЭ связано с еще большими трудностями, обусловленными необходимостью использования датчиков положения ротора.

Для решения указанных проблем (пульсационных потерь, потерь в подшипниковых опорах и их ресурса) предлагается применение в сверхвысокооборотных ЭМПЭ комбинации пассивных магнитных подшипников, установленных со смещением совместно с механическими подшипниками, обеспечивающими крепление ротора в осевом направлении [6].

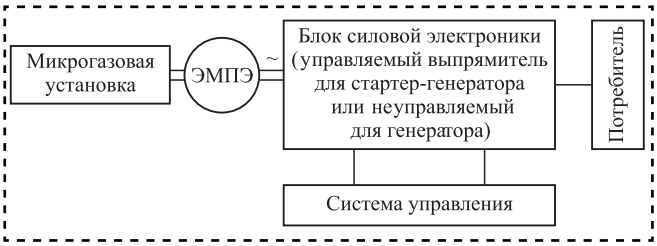


Рис. 1. Структурная схема сверхвысокооборотного ЭМПЭ

Смещение магнитных колец в магнитомеханических подшипниках необходимо для создания дополнительной аксиальной силы, которая будет разгружать механические аксиальные подшипники. Также предлагается применение беспазовой обмотки кольцевого типа со скосом. Это позволит снизить пульсационные потери в бандажной оболочке ротора и создать дополнительную аксиальную силу, которую также можно использовать для дополнительной разгрузки осевых механических подшипников [7]. Для снижения аэродинамических потерь ротора предлагается использовать антифрикционное покрытие, нанесенное на бандажную оболочку [8].

Применение таких технических решений позволит повысить КПД сверхвысокооборотных ЭМПЭ, а также значительно увеличить их ресурс.

В качестве объекта исследования рассмотрим микротурбинную систему с микрогенератором компании Onera [9]. Микрогенератор выполнен с постоянными магнитами мощностью 55 Вт при номинальной частоте вращения ротора 840 000 мин$^{-1}$. Тип подшипниковых опор — механические высокооборотные подшипники. Число пар полюсов ЭМПЭ равно 1, тогда при данной частоте вращения ротора частота выходного напряжения составляет 14 000 Гц (рис. 2).

Характеристики сверхвысокооборотного микрогенератора Onera

Мощность, Вт	55
Номинальная частота, мин$^{-1}$	840 000
Внешний диаметр статора, мм	25
Активная длина, мм	22

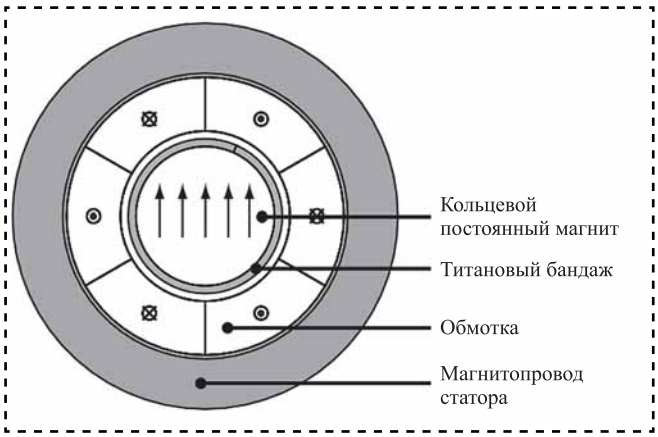


Рис. 2. Конструктивная схема высокооборотного микрогенератора

Диаметр вала, мм	4
КПД (расчет), %	91
Расчетные омические потери в обмотке, Вт	2,26
Потери на вихревые токи в обмотке, Вт	0,07
Потери в стали, Вт	0,18
Аэродинамические потери в роторе, Вт	2,63
Материал:	
магнитов	Sm_2Co_{17}
статора	Аморфное железо
вала и бандажа	Титан
Тип магнитной системы	Цилиндрический постоянный магнит
Тип конструкции статора	Беспазовая

Новые технические решения для создания сверхвысокооборотных электромеханических преобразователей энергии

На рис. 3 представлена конструктивная схема предлагаемых магнитомеханических подшипников сверхвысокооборотного ЭМПЭ.

За счет смещения магнитных колец пассивного магнитного подшипника сила в воздушном зазоре между магнитными кольцами имеет две составляющие (рис. 4 на стр. 2 обложки): радиальную и аксиальную. Аксиальная сила необходима для разгрузки механического подшипника, а радиальная — для создания основной тяговой силы. Для оценки создаваемой аксиальной силы в предлагаемой конструкции магнитомеханических подшипников разработана конечно-элементная модель (см. рис. 4 на стр. 2 обложки) и проведено компьютерное моделирование в программном комплексе Ansys.

При компьютерном моделировании рассматривали магнитный подшипник на постоянных магнитах с коэрцитивной силой 900 кА/м и остаточной индукцией 1,1 Тл; толщина кольца 3 мм и активная длина 5 мм. Внешний диаметр внутреннего магнитного кольца составлял 10 мм (равен диаметру ротора). Зазор между кольцами — 1 мм. На рис. 5 (на стр. 2 обложки) представлено трехмерное распределение магнитного поля в пассивном магнитном подшипнике, полученное в результате компьютерного моделирования.

Зависимость аксиальной и радиальной сил в пассивном магнитном подшипнике от величины смещения колец показана на рис. 6.

Одновременно со смещением магнитных колец в сверхвысокооборотном ЭМПЭ предлагается использовать скос кольцевой обмотки, что позволит минимизировать потери от высших гармоник. Наличие скоса обмотки приведет к проявлению дополнительной аксиальной силы, которая будет зависеть от угла скоса, силы тока, протекающего по обмоткам и магнитной индукции в воздушном зазоре. Данная сила будет дестабилизирующим фактором, поэтому ее необходимо учитывать на стадии проектирования сверхвысокооборотного ЭМПЭ. Для оценки данной силы разработана трехмерная компьютерная модель сверхвысокооборотного ЭМПЭ. В результате компьютерного

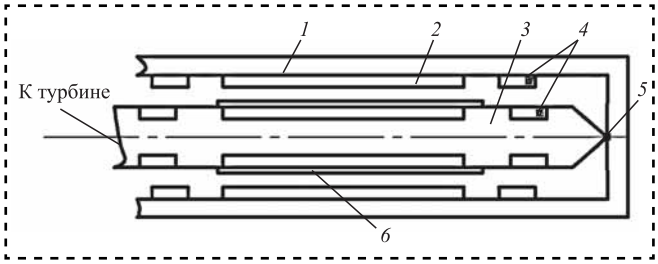


Рис. 3. Конструктивная схема сверхвысокоборотного ЭМПЭ с магнитомеханическими подшипниками:
1 — корпус ЭМПЭ; *2* — беспазовый статор ЭМПЭ, выполненный из аморфного железа с кольцевой обмоткой, расположенной со скосом; *3* — ротор с постоянными магнитами; *4* — пассивные магнитные подшипники, расположенные со смещением магнитных колец; *5* — механический осевой подшипник, который может представлять собой шарик, или конический скос с алмазным напылением; *6* — бандажная оболочка ротора

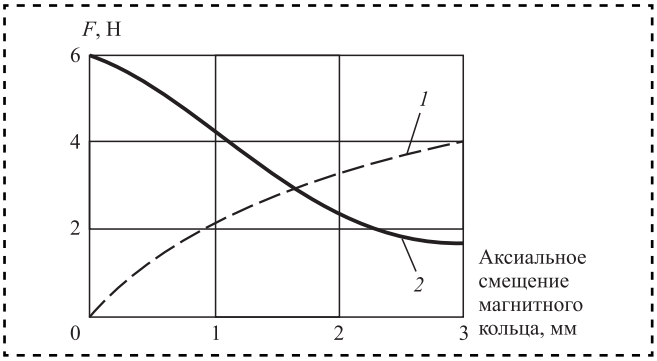


Рис. 6. Зависимость аксиальной и радиальной составляющих сил от смещения магнитных колец в осевом направлении:
1 — аксиальная сила; *2* — радиальная сила

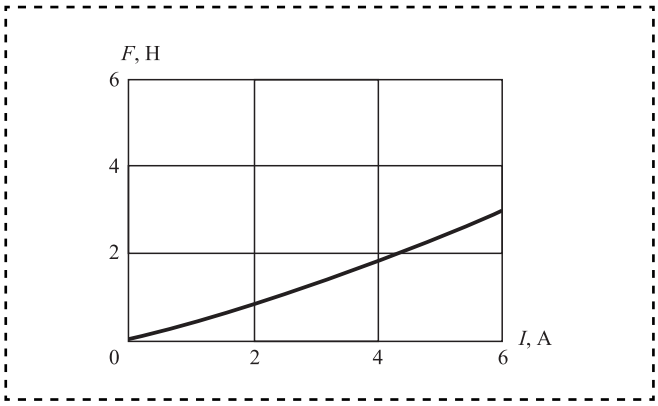


Рис. 7. Зависимость аксиальной силы обмотки со скосом от силы тока

моделирования получена зависимость данной аксиальной силы от силы тока в обмотках сверхвысокооборотного ЭМПЭ (рис. 7).

Аксиальные силы при осевом смещении магнитных колец в пассивных магнитных подшипниках и аксиальные силы, обусловленные скосом кольцевой обмотки, соизмеримы (1,8 Н при скосе обмотки и токе 4 А и 2,1 Н при смещении магнитных колец в пассивных магнитных подшипниках на 1,1 мм). Тогда очевидно, что смещение магнитных колец в подшипнике в данном случае необходимо выполнять только с одной стороны ротора. С другой стороны данное смещение будет уравновешенно аксиальными силами, обусловленными скосом обмотки.

Предлагаемая конструкция магнитомеханических подшипников способна обеспечить работоспособность всей системы при массе ротора до 1 кг и разгрузить при этом осевые механические подшипники на 2 Н. Учитывая размеры исследуемой конструкции генератора Onera, видно, что масса ротора не превышает 100 г, т.е. представленная конструкция позволяет обеспечить эффективную эксплуатацию генератора Onera и значительно повысить его ресурс, а также отказаться от смазочных материалов. Применение скоса обмотки позволяет минимизировать пульсационные потери и повысить КПД сверхвысокооборотного микрогенератора.

Для уменьшения потерь ротора на трение об воздух можно рекомендовать применение антифрикционных покрытий поверхности ротора [8].

Выводы

Применение предлагаемой конструкции магнитомеханических подшипников совместно со скосом обмотки статора позволяет отказаться от смазочных материалов в сверхвысокооборотных микрогенератрах, повысить их ресурс и увеличить КПД на 2...3 %. При этом для минимизации аэродинамических потерь рекомендуется использовать антифрикционные покрытия, наносимые на бандажную оболочку ротора. Полученные результаты могут быть использованы на практике при разработки сверхвысокооборотных микрогенератров.

Библиографический список

1. **Borisavljevic A., Polinder H., Ferreira J.** On the Speed Limits of Permanent-Magnet Machines // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010. Vol. 57. N 1. P. 220—227.

2. **Rahman M.A., Chiba A., Fukao T.** Super high-speed electrical machines — summary // IEEE Power Engineering Society General Meeting. June 6—10, 2004. Vol. 2. P. 1272—1275.

3. **Oyama J., Higuchi T., Abe T., Shigematm K. X. Yang, Matsuo E.** A trial production of small size ultra-high speed drive system // IEMDC2003. 2003. Vol. 1. N 2-1-1. P. 31—36.

4. **Zwyssig C., Kolar J.W., Round S.D.** Mega-Speed Drive Systems: Pushing Beyond 1 Million RPM // Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on, 2009. Vol. 14. N 5. P. 564—574.

5. **Zwyssig C., Round S.D., Kolar J.W.** Power Electronics Interface for a 100 W, 500000 rpm Gas Turbine Portable Power Unit // Applied Power Electronics Conference, Dallas, Texas, USA, March 19—23. 2006. P. 283—289.

6. **Высокоскоростной** шпиндель: патент на изобретение № 2468895 C1 B23B19/02 / Хайруллин И.Х., Исмагилов Ф.Р., Пашали Д.Ю., Вавилов В.Е.; опубл. 10.12.2012.

7. **Способ** разгрузки подшипников электромеханических преобразователей энергии: пат. 2557333 Рос. Федерация: МПК ^{7}F 16 C 39/06 / Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е.

8. **Кручинина И.Ю., Антипов В.Н.** Проблемные вопросы создания высокоскоростных минитурбогенераторов и пути их решения // Информационно-управляющие системы. 2012. № 4. С. 25—34.

9. **Guidez J., Ribaud Y., Dessornes O. et al.** Micro gas turbine research at Onera // International Symposium on Measurement and Control in robotics. Brussels. Belgium. 2005.

УДК 621.757.05-52

Л.Б. Черняховская, *канд. физ.-мат. наук*
(Самарский государственный технический университет)
E-mail: tms@samgtu.ru

Влияние вращательного движения вала на процесс автоматической сборки цилиндрических деталей

Рассмотрен процесс вертикальной схемы сборки цилиндрических деталей с гарантированным зазором, отличающийся тем, что вал, опирающийся на три точки кромки отверстия втулки, совершает вращательное движение вокруг своей оси. Движение вала в этом случае состоит из плоскопараллельного движения, обеспечивающего процесс совмещения деталей, и вращательного, которое не влияет на его продвижение внутрь отверстия втулки. Составлена система дифференциальных уравнений в обобщенных координатах, которая в зависимости от кинематических параметров движения вала определяет силы взаимодействия деталей в точках контакта и значения сборочных моментов, осуществляющих процесс совмещения. Представлены результаты графического решения уравнений с помощью программы Mathcad для различных режимов сборки конкретных деталей, которые показали, что силы взаимодействия в симметричных точках контакта при сообщении валу вращательного движения уменьшаются и становятся тем меньше, чем больше его угловая скорость, что улучшает условия совмещения деталей и повышает качество сборки.

We have considered the process of the vertical assembly scheme of cylindrical details with the guaranteed gap. As a distinctive feature, a shaft, leaning on three points of the bush hole edge, makes a rotating motion around its axis. The motion of the shaft consists in this case of a plane-parallel motion that leads the assembly of the details, and of a rotating one that doesn't affect the feed motion of the shaft into the bush. The set of differential equations in generalized coordinates, relating the interaction force between details at the points of contact and the values of the assembling torques to kinematic features of the plane-parallel and the rotating motions, was formed. The results of graphical solution of equations with Mathcad for different regimes of assembly of certain details were presented. They showed that interaction forces in symmetrical points of contact are decreasing when the shaft rotates. The bigger the angular speed is the lower are these interaction forces. It improves the conditions of the details overlapping and increases the quality of assembly.

Ключевые слова: цилиндрические детали, три точки контакта, вращательное движение, две степени свободы, динамические реакции, дифференциальные уравнения.

Keywords: cylindrical details, three-points contact, rotational motion, two degrees of freedom, dynamical reaction, differential equations.

Сборка цилиндрических деталей составляет значительную часть всех сборочных операций, поэтому автоматизация этого процесса остается актуальной задачей машиностроения. Качество и надежность сборки зависят от того, насколько точно механическое движение, передаваемое деталям сборочным устройством, соответствует объективным закономерностям движения, необходимого для их совмещения.

В большинстве устройств, предназначенных для автоматической сборки цилиндрических деталей с гарантированным зазором, втулку закрепляют неподвижно в вертикальном положении, вал устанавливают на кромку ее отверстия под углом к оси $\gamma > \arccos d/D$ (d — диаметр вала, D — диаметр отверстия втулки), что гарантирует контакт деталей в трех точках. После этого валу сообщают плоскопараллельное движение с основной плоскостью, совпадающей с плоскостью симметрии деталей, обеспечивающее их совмещение. Недостатком такого способа является значительное увели-

чение сил взаимодействия в точках контакта, которые при уменьшении угла γ могут достигать значений, приводящих к повреждению поверхностей и заклиниванию деталей. С целью повышения надежности и качества сборки в целом ряде устройств валу кроме основного плоскопараллельного движения сообщают одно из дополнительных движений: вращение вокруг своей оси или вращение вокруг оси втулки, при которых сохраняется контакт деталей в трех точках.

Проведем динамический анализ движения вала (рис. 1), опирающегося на три точки K, B_1 и B_2 кромки горизонтального отверстия при условии изменения двух его обобщенных координат в зависимости от времени: угла собственного вращения $\varphi = \varphi(t)$, определяющего вращение вала вокруг своей оси, и угла нутации $\gamma = \gamma(t)$ между осями деталей, характеризующего плоскопараллельное движение совмещения. Угол прецессии сохраняется постоянным, а вращательное движение не влияет на продвижение вала внутрь отверстия втулки.

Цель работы — определение сил взаимодействия в точках контакта и необходимых сборочных сил, обеспечивающих процесс

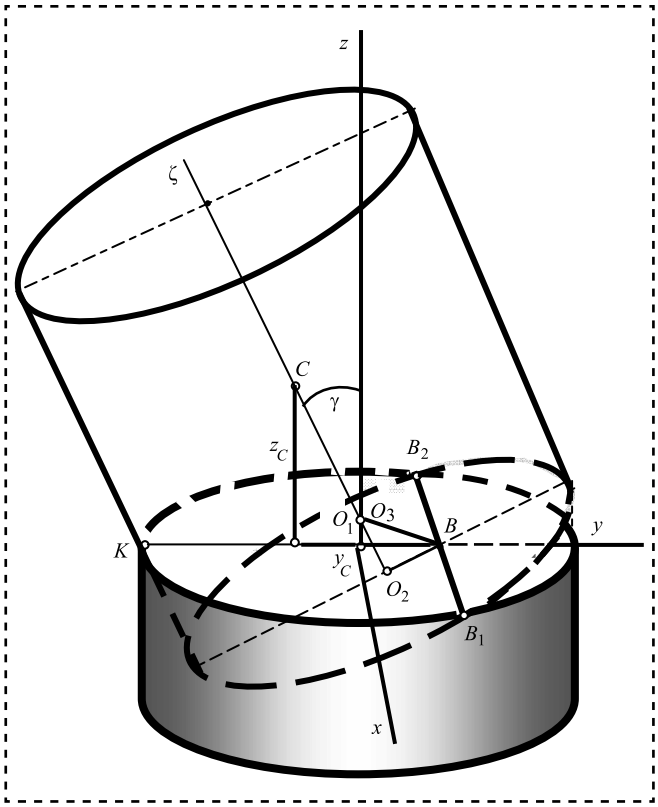


Рис. 1. Относительное расположение деталей при контакте в трех точках

совмещения деталей для заданных законов изменения обобщенных координат.

При решении задачи вал и втулку считают твердыми телами правильной геометрической формы с размерами. Положение вала в процессе совмещения определяют относительно неподвижной системы координат O_1xyz (см. рис. 1), начало которой находится в центре окружности O_1 совмещаемой кромки втулки, ось O_1z совпадает с осью втулки, ось O_1y направлена по диаметру ее кромки, расположенному в плоскости симметрии деталей, ось O_1x — перпендикулярна плоскости симметрии деталей и параллельна отрезку, соединяющему симметричные точки контакта B_1 и B_2. Третья точка контакта K расположена между образующей вала и кромкой отверстия втулки в плоскости симметрии.

При расчетах используют результаты анализа относительного расположения деталей при опоре вала на три точки [1], например, такие, как расстояния этих точек до центров окружностей совмещаемых торцов в зависимости от угла γ, координаты точки пересечения осей совмещаемых деталей и центра масс вала.

Для определения сил, действующих на вал в точках контакта, используют дифференциальные уравнения движения центра масс:

$$m\frac{d^2x_C}{dt^2} =; \; m\frac{d^2y_C}{dt^2} = \sum F_{Ky}; \quad m\frac{d^2z_C}{dt^2} = \sum F_{Kz}, \tag{1}$$

где x_C, y_C, z_C — координаты центра масс вала;

$\sum F_{Kx}$, $\sum F_{Ky}$, $\sum F_{Kz}$ — суммы проекций всех действующих на вал сил на оси координат.

При движении, характеризуемом двумя степенями свободы γ и φ, ось вращения вала O_1z остается в плоскости симметрии деталей O_1yz, следовательно, $x_C = 0$ и $\frac{d^2x_C}{dt^2} = 0$. Координаты y_C и z_C [1] не зависят от угла φ:

$$y_C = -0,5\left(H\sin\gamma + D - d\cos\gamma\right);$$

$$z_C = 0,5H\cos\gamma - \frac{2D\cos\gamma - d\left(1+\cos^2\gamma\right)}{2\sin\gamma},$$

где d — диаметр;

H — высота вала;

D — диаметр отверстия втулки.

Действующими на вал силами являются сборочный момент M_γ, обеспечивающий процесс

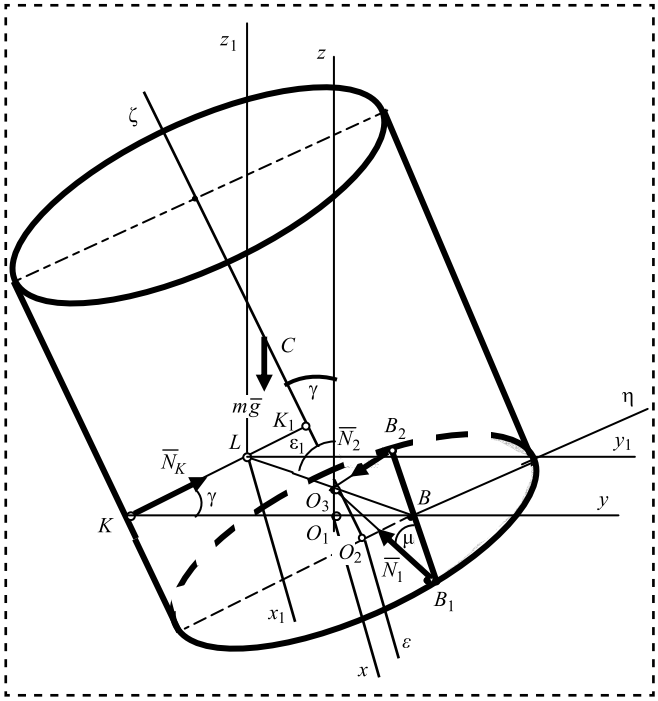


Рис. 2. Расположение нормальных реакций в точках контакта

совмещения деталей, момент M_φ, сообщающий валу вращательное движение, сила тяжести $m\bar{g}$ и силы, приложенные в точках контакта, которые состоят из нормальных реакций и сил трения, связанных между собой законом Кулона.

Для составления правых частей уравнений системы (1) необходимо определить проекции нормальных реакций и сил трения на оси координат.

Нормальная реакция $\bar{N}_K$ в точке K (рис. 2) направлена по радиусу вала KK_1 в плоскости симметрии деталей, ее проекции на оси координат равны:

$$N_{Kx} = 0;\ N_{Ky} = N_K \cos\gamma;\ N_{Kz} = N_K \sin\gamma.$$

Нормальные реакции $\bar{N}_1$ и $\bar{N}_2$ в симметричных точках контакта B_1 и B_2 (см. рис. 2) проходят через точку O_3 пересечения осей вала и втулки, составляя угол μ с отрезком, соединяющим эти точки, их проекции на оси координат равны:

$$\begin{gathered} N_{1x} = -N_1 \cos\mu;\ N_{1y} = -N_1 \sin\mu \sin\varepsilon_1; \\ N_{1z} = N_1 \sin\mu \cos\varepsilon_1;\ N_{2x} = N_2 \cos\mu; \\ N_{2y} = -N_2 \sin\mu \sin\varepsilon_1;\ N_{2z} = N_2 \sin\mu \cos\varepsilon_1, \end{gathered} \qquad (2)$$

где ε_1 — угол между осью втулки и прямой, проходящей через точки O_3 и B.

Сила трения в каждой точке контакта противоположна абсолютной скорости, которая складывается из скорости вращательного движения вала вокруг своей оси и скорости плоскопараллельного движения.

Скорости $\bar{V}_K^\varphi$, $\bar{V}_1^\varphi$, $\bar{V}_2^\varphi$ вращательного движения точек контакта K, B_1 и B_2 (рис. 3) расположены в плоскости нижнего торца вала перпендикулярно его радиусам. Значения вращательных скоростей во всех точках контакта одинаковы по величине:

$$V_K^\varphi = V_1^\varphi = V_2^\varphi = 0,5d\dot{\varphi}.$$

Скорость $\bar{V}_K^\gamma$ точки K при плоскопараллельном движении направлена по образующей вала (рис. 4), скорость $\bar{V}_A^\gamma$ точки A — по обра-

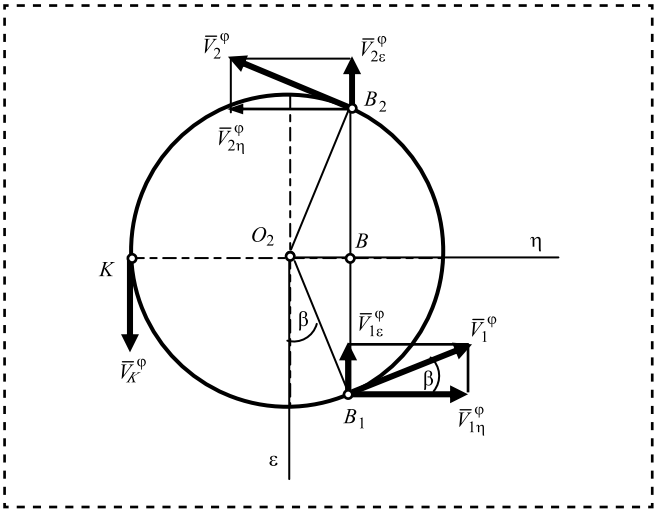


Рис. 3. Проекции скоростей вращательного движения на оси координат $O_2\eta$ и $O_2\varepsilon$, связанные с валом

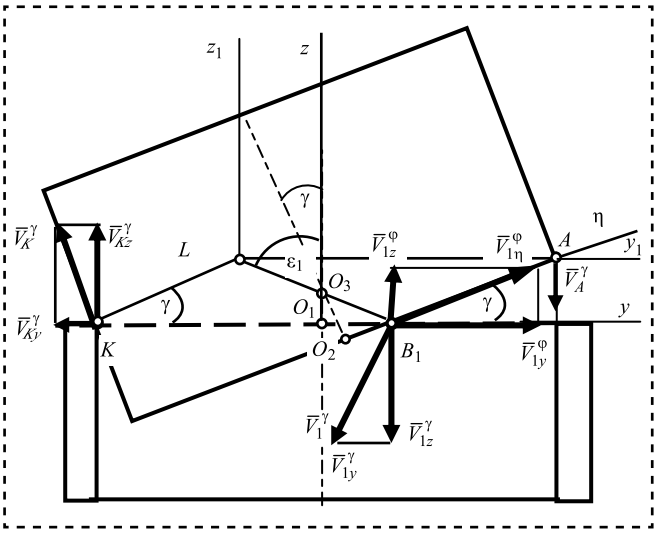


Рис. 4. Проекции скоростей в точках K и B_1 на неподвижные оси координат O_1y и O_1z

зующей внутренней поверхности втулки, что позволяет определить положение мгновенного центра скоростей L как точку пересечения перпендикуляров к этим скоростям. Следовательно, скорость точки B, являющейся серединой отрезка B_1B_2 и расположенной в плоскости симметрии деталей, будет перпендикулярна отрезку BL и равна $V_B^\gamma = \dot\gamma BL$. Скорость точки K равна $V_K^\gamma = \dot\gamma KL$. Скорости в симметричных точках контакта B_1 и B_2 равны между собой, параллельны и равны скорости точки B $V_1^\gamma = V_2^\gamma = V_B^\gamma = \dot\gamma BL$.

Учитывая направления составляющих скоростей (см. рис. 3, 4), получаем проекции абсолютной скорости каждой точки контакта на неподвижные оси координат.

Проекции и модуль абсолютной скорости точки K равны

$$V_{Kx} = V_K^\varphi = 0,5d\dot\varphi;\ V_{Ky} = V_K^\gamma = -\dot\gamma KL\sin\gamma;\ V_{Kz} = V_K^\gamma = \dot\gamma KL\cos\gamma;\ V_K = \sqrt{0,25d^2\dot\varphi^2 + (\dot\gamma KL)^2}.$$

Проекции и модули скоростей $\bar V_1$, $\bar V_2$ точек B_1 и B_2 на неподвижные оси координат после преобразований принимают вид

$$V_{1x} = -S_2\dot\varphi;\ V_{1y} = B\dot\varphi\cos\gamma - 2a_1\dot\gamma;\ V_{1z} = B\dot\varphi\sin\gamma - 2S_1\dot\gamma;$$

$$V_1 = \sqrt{0,25d^2\dot\varphi^2 + 4B_1^2\dot\gamma^2 - 4Ba_2\dot\varphi\dot\gamma};\ V_{2x} = -S_2\dot\varphi;\ V_{2y} = -\left(B\dot\varphi\cos\gamma + 2a_1\dot\gamma\right);\ V_{2z} = -\left(B\dot\varphi\sin\gamma + 2S_1\dot\gamma\right);$$

$$V_2 = \sqrt{0,25d^2\dot\varphi^2 + 4B_1^2\dot\gamma^2 + 4Ba_2\dot\varphi\dot\gamma},$$

где
$$a_1 = O_1O_3 = \frac{d - D\cos\gamma}{2\sin\gamma};\ a_2 = O_1O_2 = \frac{D - d\cos\gamma}{2\sin\gamma};\ S_1 = \frac{D(1+\cos^2\gamma) - 2d\cos\gamma}{2\sin^2\gamma};$$

$$B = BB_1 = \sqrt{0,25D^2 - S_1^2};\ B_1 = O_3B = \sqrt{a_1^2 + S_1^2};\ S_2 = \frac{2D\cos\gamma - d\left(1+\cos^2\gamma\right)}{2\sin^2\gamma}.$$

Следовательно, проекции сил трения на оси координат будут равны

$$\begin{gathered}
F_{Kx} = -fN_K\frac{0,5d\dot\varphi}{V_K};\ F_{Ky} = fN_K\frac{2a_1\dot\gamma}{V_K};\ F_{Kz} = -fN_K\frac{2a_1\operatorname{ctg}\gamma\dot\gamma}{V_K};\\
F_{1x} = fN_1\frac{S_2\dot\varphi}{V_1};\ F_{1y} = fN_1\frac{2a_1\dot\gamma - B\cos\gamma\dot\varphi}{V_1};\ F_{1z} = fN_1\frac{2S_1\dot\gamma - B\sin\gamma\dot\varphi}{V_1};\\
F_{2x} = fN_2\frac{S_2\dot\varphi}{V_2};\ F_{2y} = fN_2\frac{2a_1\dot\gamma + B\cos\gamma\dot\varphi}{V_2};\ F_{2z} = fN_2\frac{2S_1\dot\gamma + B\sin\gamma\dot\varphi}{V_2}.
\end{gathered} \tag{3}$$

После подстановки проекций нормальных реакций (2), сил трения (3) на оси координат и значений производных $\frac{d^2y_C}{dt^2}$ и $\frac{d^2z_C}{dt^2}$ в уравнения (1) получаем систему трех уравнений, неизвестными в которых являются нормальные реакции в точках контакта N_K, N_1 и N_2:

$$\begin{gathered}
-fN_K\frac{0,5d\dot\varphi}{V_K} - N_1\left(\cos\mu + f\frac{S_2\dot\varphi}{V_1}\right) + N_2\left(\cos\mu + f\frac{S_2\dot\varphi}{V_2}\right) = 0;\\
N_K\left(\cos\gamma + f\frac{KL\dot\gamma\sin\gamma}{V_K}\right) - N_1\left(\frac{S_2}{S_3} + f\frac{B\cos\gamma\dot\varphi - 2a_1\dot\gamma}{V_1}\right) - N_2\left(\frac{S_2}{S_3} - f\frac{2a_1\dot\gamma + B\cos\gamma\dot\varphi}{V_2}\right) =\\
= 0,5H\left(\sin\gamma + d\cos\gamma\right)\dot\gamma^2 - 0,5\left(H\cos\gamma - d\sin\gamma\right)\ddot\gamma;\\
N_K\left(\sin\gamma - f\frac{KL\dot\gamma\cos\gamma}{V_K}\right) + N_1\left(\frac{a_2}{S_3} + f\frac{2S_1\dot\gamma - B\cos\gamma\dot\varphi}{V_1}\right) + N_2\left(\frac{a_2}{S_3} + f\frac{2a_1\dot\gamma + B\cos\gamma\dot\varphi}{V_2}\right) =\\
= mg + \left[-0,5H\cos\gamma + \frac{2S_1\cos\gamma - S_2\left(4+\sin^2\gamma\right)}{\sin\gamma}\right]\dot\gamma^2 - \left(0,5H\sin\gamma - 2S_1 + S_2\cos\gamma\right)\ddot\gamma.
\end{gathered} \tag{4}$$

Полученная система уравнений (4) определяет значения нормальных реакций в зависимости от кинематических характеристик движения вала, а полные динамические реакции $\bar{R}$, являющиеся силами взаимодействия в каждой из точек контакта с учетом сил трения $F = fN$, находятся по формуле

$$R = \sqrt{N^2 + F^2} = N\sqrt{1 + f^2},$$

где f — коэффициент трения.

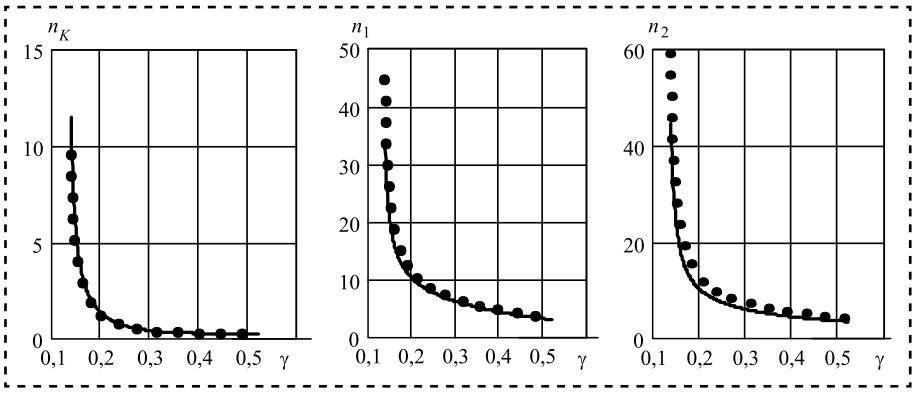


Рис. 5. Графики изменения сил взаимодействия деталей в точках контакта в зависимости от угла γ между их осями:
●●●● — $\dot{\varphi}_1 = 2$ с$^{-1}$; —— — $\dot{\varphi}_2 = 20$ с$^{-1}$

Определение динамических реакций в точках контакта проводили графически с помощью программы Mathcad, в которой составлен алгоритм решения задачи в общем виде, позволяющем менять режим сборки и размеры совмещаемых деталей.

В связи с тем, что процесс совмещения деталей протекает достаточно быстро и скорости составляющих движений не успевают значительно измениться, анализировали движение вала, при котором оба составляющих движения являются равномерными, т.е. $\dot{\gamma} = \text{const}$, $\dot{\varphi} = \text{const}$.

В этом случае система уравнений (4) приводится к виду

$$\begin{gathered}
-fN_K\frac{0,5d\dot{\varphi}}{V_K} - N_1\left(\cos\mu + f\frac{S_2\dot{\varphi}}{V_1}\right) + \\
+N_2\left(\cos\mu + f\frac{S_2\varphi}{V_2}\right) = 0; \\
N_K\left(\cos\gamma + f\frac{KL\dot{\gamma}\sin\gamma}{V_K}\right) - \\
-N_1\left(\frac{S_2}{S_3} + f\frac{B\cos\gamma\dot{\varphi} - 2a_1\dot{\gamma}}{V_1}\right) - \\
-N_2\left(\frac{S_2}{S_3} - f\frac{2a_1\dot{\gamma} + B\cos\gamma\dot{\varphi}}{V_2}\right) = \\
= 0,5H(\sin\gamma + d\cos\gamma)\dot{\gamma}^2; \\
N_K\left(\sin\gamma - f\frac{KL\dot{\gamma}\cos\gamma}{V_K}\right) + \\
+N_1\left(\frac{a_2}{S_3} + f\frac{2S_1\dot{\gamma} - B\cos\gamma\dot{\varphi}}{V_1}\right) + \\
+N_2\left(\frac{a_2}{S_3} + f\frac{2a_1\dot{\gamma} + B\cos\gamma\dot{\varphi}}{V_2}\right) = \\
= mg + m\left[-0,5H\cos\gamma + \frac{2S_1\cos\gamma - S_2\left(4 + \sin^2\gamma\right)}{\sin\gamma}\right]\dot{\gamma}^2.
\end{gathered} \tag{5}$$

Результаты решения полученной системы уравнений (5) приводят для деталей с размерами: $D = 50$ мм, $d = 49,9$ мм, $H = 70$ мм при условии, что угол между осями деталей меняется по закону $\gamma = \gamma_0 - \dot{\gamma}t$, в котором время совмещения определяется интервалом изменения угла γ, заключенным между начальным значением $\gamma_0 = 0,52$ рад и конечным значением $\gamma = \arccos d/D$, при котором контакт деталей в трех точках сменяется двухточечным контактом. За единицу измерения сил, действующих в точках контакта, выбрана сила тяжести вала mg, что позволяет более наглядно оценить их величину.

На рис. 5 представлены графики зависимостей от угла γ величин, представляющих отношения сил взаимодействия к силе тяжести вала $n_K = \frac{R_K}{mg}$; $n_1 = \frac{R_1}{mg}$ и $n_2 = \frac{R_2}{mg}$ в точках контакта K, B_1 и B_2 для двух значений угловой скорости вращательного движения: $\dot{\varphi}_1 = 2$ с$^{-1}$, и $\dot{\varphi}_2 = 20$ с$^{-1}$ при постоянной угловой скорости плоскопараллельного движения $\dot{\gamma} = 0,2$ с$^{-1}$.

Силы взаимодействия во всех точках контакта при приближении угла γ к своему минимальному значению $\gamma = \arccos d/D$ резко возрастают для каждого значения угловой скорости вращательного движения, но при ее увеличении сила в точке K увеличивается, а силы взаимодействия в симметричных точках контакта уменьшаются, что улучшает условия совмещения деталей, так как именно силы, действующие в симметричных точках контакта, являются причиной заклинивания.

Для определения сборочного момента M_γ, обеспечивающего процесс совмещения

деталей, применяют дифференциальное уравнение плоскопараллельного движения, полученное в результате преобразования соответствующего уравнения Лагранжа [1]:

$$m\left[\left(\frac{dy_C}{d\gamma}\right)^2+\left(\frac{dz_C}{d\gamma}\right)^2\right]\ddot{\gamma}+I_{Cx}\ddot{\gamma}+ \\ +m\left(\frac{dy_C}{d\gamma}\frac{d^2y_C}{d\gamma^2}+\frac{dz_C}{d\gamma}\frac{d^2z_C}{d\gamma^2}\right)\dot{\gamma}^2=Q_\gamma, \quad (6)$$

где I_{Cx} — момент инерции вала относительно оси, проходящей через центр масс C перпендикулярно плоскости симметрии деталей;

Q_γ — обобщенная сила.

Обобщенная сила при плоскопараллельном движении равна сумме моментов всех приложенных к валу сил относительно мгновенной оси вращения Lx_1. Для определения моментов используем подвижную систему координат $Lx_1y_1z_1$, начало которой связываем с мгновенным центром скоростей L (см. рис. 2, 4), ось Lx_1 направлена перпендикулярно плоскости симметрии деталей, ось Ly_1 параллельна оси O_1y, а ось Lz_1 параллельна оси O_1z.

Нормальные реакции во всех точках контакта пересекают ось Lx_1, следовательно, их моменты относительно этой оси равны нулю. Таким образом, обобщенная сила складывается из вращающего момента M_γ, момента силы тяжести $m\bar{g}$ и суммы моментов сил трения в точках контакта:

$$Q_\gamma=\sum m_{Lx1}\left(\bar{F}_K\right)= \\ =-M_\gamma+m_{Lx1}\left(m\bar{g}\right)+\sum m_{Lx1}\left(\bar{F}_{\text{тр}}\right). \quad (7)$$

Момент силы тяжести относительно оси Lx_1 равен

$$m_{Lx1}(mg)=mg\left[(0,5H-a_1)\sin\gamma-S_1\right].$$

Моменты сил трения относительно оси Lx_1 подсчитывают по формуле:

$$m_{Lx1}(F)=y_1F_z-z_1F_y,$$

где y_1 и z_1 — координаты точки приложения силы F_y;

F_z — проекции силы на эти оси координат.

Координаты точек контакта K, B_1 и B_2 равны $y_{B1}=y_{B2}=2S_1$; $z_{B1}=z_{B2}=-2a_1$; $y_{K1}=KL\cos\gamma$; $z_{K1}=-KL\sin\gamma$.

Проекции сил трения на оси Ly_1 и Lz_1 равны их проекциям на оси O_1y и O_1z, поскольку эти оси параллельны, значения этих проекций определены выражениями (3).

После подстановки всех необходимых значений в выражение (7) получим сумму моментов всех сил, приложенных к валу относительно оси Lx_1, следовательно, обобщенная сила равна

$$Q_\gamma=-M_\gamma+2fN_1\frac{2B_1^2\dot{\gamma}-Ba_2\dot{\varphi}}{V_1}+ \\ +2fN_2\frac{2B_1^2\dot{\gamma}+Ba_2\dot{\varphi}}{V_2}+fN_K\frac{(KL)^2}{V_K}\dot{\gamma}+ \\ +mg\left[(H-a_1)\sin\gamma-S_1\right]. \quad (8)$$

Подставим значение Q_γ в уравнение (6) и выразим из полученного равенства значение M_γ:

$$M_\gamma=2fN_1\frac{2B_3^2\dot{\gamma}-Ba_2\dot{\varphi}}{V_1}+2fN_2\frac{2B_3^2\dot{\gamma}+Ba_2\dot{\varphi}}{V_2}+ \\ +fN_K\frac{(KL)^2}{V_K}\dot{\gamma}+mg\left[(0,5H-a_1)\sin\gamma-S_1\right]- \\ -m\left[\left(\frac{dy_C}{d\gamma}\right)^2+\left(\frac{dz_C}{d\gamma}\right)^2+I_{C\eta}\right]\ddot{\gamma}+ \\ +m\left(\frac{dy_C}{d\gamma}\frac{d^2y_C}{d\gamma^2}+\frac{dz_C}{d\gamma}\frac{d^2z_C}{d\gamma^2}\right)\dot{\gamma}^2. \quad (9)$$

Как следует из равенства (9), значение сборочного момента M_γ, необходимое для совмещения деталей, определяется нормальными реакциями и законами $\gamma=\gamma(t)$ и $\varphi=\varphi(t)$ составляющих движений сборочного процесса.

Для определения момента M_φ, сообщающего валу вращательное движение вокруг своей оси, применют дифференциальное уравнение

$$I_\zeta\frac{d^2\varphi}{dt^2}=\sum m_\zeta(\bar{F}_K), \quad (10)$$

где I_ζ — момент инерции вала относительно его оси $O_2\zeta$;

$\sum m_\zeta\left(\bar{F}_K\right)$ — сумма моментов всех приложенных к валу сил относительно этой оси.

Поскольку центр тяжести вала лежит на его оси, а линии действия всех нормальных реакций пересекают эту ось, то момент силы тяжести и моменты нормальных реакций относительно оси $O_2\zeta$ равны нулю.

Моменты сил трения относительно оси $O_2\zeta$ определяют формулой

$$m_\zeta = \varepsilon F_\eta - \eta F_\varepsilon,$$

где ε и η — координаты точек контакта в системе координат $O_2\varepsilon\eta\zeta$, связанной с центром нижнего торца валом, в которой ось $O_2\zeta$ совпадает с осью вала, $O_2\varepsilon$ направлена перпендикулярно плоскости симметрии деталей, ось $O_2\eta$ — по диаметру вала, расположенному в плоскости симметрии деталей.

Координаты точек контакта в выбранной системе координат равны

$$\varepsilon_{B1} = BB_1 = B;\ \eta_{B1} = O_2B = S_2;\ \varepsilon_{B2} = -BB_2 = -B;$$
$$\eta_{B2} = O_2B = S_2\varepsilon_K = 0;\ \eta_K = -0,5d.$$

Проекции сил трения $\bar{F}_1$, $\bar{F}_2$ и $\bar{F}_K$ на оси $O_2\varepsilon$ и $O_2\eta$ противоположны проекциям абсолютных скоростей, которые после преобразований приводятся к виду (см. рис. 3):

$$V_{K\varepsilon} = 0,5d\dot{\varphi};\ V_{1\varepsilon} = -S_2\dot{\varphi};\ V_{2\varepsilon} = -S_2\dot{\varphi};\ V_{K\eta} = -\dot{\gamma}KL\sin\gamma;$$
$$V_{1\eta} = B\dot{\varphi} - BL\cos\varepsilon_2\gamma;\ V_{2\eta} = -B\dot{\varphi} - BL\cos\varepsilon_2\dot{\gamma}.$$

Сумма моментов всех сил трения относительно оси $O_2\zeta$ после преобразований будет равна

$$\sum m_\zeta\left(\bar{F}_K\right) = -fN_K\frac{0,25d^2\dot{\varphi}}{V_K} -$$
$$-fN_1\frac{0,25d^2\dot{\varphi} - Ba_2\dot{\gamma}}{V_1} - fN_2\frac{0,25d^2\dot{\varphi} + Ba_2\dot{\gamma}}{V_2}.$$

Следовательно, уравнение (10) принимает вид

$$I_\zeta\frac{d^2\varphi}{dt^2} = M_\varphi - fN_K\frac{0,25d^2\dot{\varphi}}{V_K} -$$
$$-fN_1\frac{0,25d^2\dot{\varphi} - Ba_2\dot{\gamma}}{V_1} - fN_2\frac{0,25d^2\dot{\varphi} + Ba_2\dot{\gamma}}{V_2}.$$

Откуда

$$M_\varphi = I_\zeta\frac{d^2\varphi}{dt^2} + fN_K\frac{0,25d^2\varphi}{V_K} +$$
$$+fN_1\frac{0,25d^2\dot{\varphi} - Ba_2\dot{\gamma}}{V_1} + fN_2\frac{0,25d^2\dot{\varphi} + Ba_2\dot{\gamma}}{V_2}. \quad (11)$$

Уравнения (9) и (11), после того, как установлены значения нормальных реакций N_1, N_2 и N_K в точках контакта, позволяют определить значения сборочных сил, обеспечивающих совмещение деталей по заданным законам плоскопараллельного и вращательного движений $\gamma = \gamma(t)$, $\varphi = \varphi(t)$, совершаемых валом. Как следует из этих уравнений, значения моментов M_γ и M_φ, так же, как и значения реакций, резко возрастают в момент прекращения контакта деталей в трех точках. В зависимости от размеров деталей, величины гарантированного зазора и законов изменения обобщенных координат, при значениях $\gamma \to \arccos d/D$, максимальные значения сборочных моментов в 50 и более раз превышают первоначальные значения.

Совокупность полученных дифференциальных уравнений (4), (9), (11) отражает кинематику и динамику процесса сборки вращающегося вокруг своей оси вала с вертикально закрепленной втулкой. Решение этих уравнений с помощью программы Mathcad для различных режимов вращательного движения установило, что силы взаимодействия в симметричных точках контакта при наличии вращательного движения уменьшаются тем значительнее, чем больше угловая скорость, что улучшает условия совмещения деталей и повышает качество сопрягаемых поверхностей. Установленные закономерности могут быть полезны при выборе параметров и режимов сборки, при разработке способов предварительной ориентации и сборочных устройств.

Библиографический список

1. **Черняховская Л.Б.** Кинематический и динамический анализы автоматической сборки цилиндрических деталей. Самара: СамГТУ. 2011. С. 52—55.
2. **Кристаль М.Г.** Оценка погрешности относительного расположения сопрягаемых поверхностей деталей при автоматической сборке цилиндрических соединений // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2000. № 6. С. 20—23.
3. **Кристаль М.Г., Чувилин И.А.** Исследование динамики вибрационного сопряжения с нижней опорой торца охватываемой детали // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2008. № 4. С. 13—17.
4. **Иванов А.А.** Вибрационные сборочные системы // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2013. № 5. С. 7—10.
5. **Холодкова А.Г.** Особенности автоматического выполнения цилиндрических соединений с малым зазором // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2004. № 4. С. 14—18.
6. **Шуваев В.Г., Папшев В.А.** Устройство пространственного ориентирования деталей при автоматической сборке путем формирования сложного колебательного движения // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. № 11. С. 23—25.

УДК 621.791.048

И.О. Бохоров, В.В. Карабанов, *канд. техн. наук*
тел. 8-915-143-59-34

Пайка трубопроводных систем*

Приведены технологии пайки технических и промышленных трубопроводов в заводских и полевых условиях, рассмотрены применяемые для их соединения паяльные материалы и свойства паяных соединений трубопроводов.

The technology of brazing technology and industrial pipelines in the factory or in the field, considered used for their connection, soldering materials and properties of solder joints of pipelines.

Ключевые слова: технические трубопроводы, промышленные трубопроводы, композиционный припой, флюс, аргон, рифление, магнитная пайка, сварко-пайка, газопроводы, эмалевое покрытие.

Keywords: technical pipelines, industrial pipes, composite solder, flux, argon, ribbed, magnetic soldering, welding, brazing, gas, enamel coating.

Широкие технические и металлургические возможности по созданию монолитных металлических соединений, равнопрочных соединяемым металлам, использованы при совершенствовании технологий сооружения промышленных трубопроводных систем — водопроводных, газопроводных и др., путем замены сварки на пайку, что позволило не только повысить эффективность производства, но и решить сложные технические задачи.

При строительстве жилых зданий значительные трудности представляет монтаж санитарно-технических трубопроводных систем ввиду затрудненного доступа к свариваемым стыкам и трудностью их качественной сборки с обеспечением заданных зазоров.

При сборке телескопических соединений стояков, имеющих соединительный стакан или раструб (рис. 8), образуются неравномерные зазоры между соединяемыми элементами труб 0,3...2,5 мм. Оси собранных труб часто не совпадают, а трубы могут касаться друг друга. Для таких соединений в ИЭС им. Е.О. Патона разработан способ магнитной пайки ферромагнитных материалов на воздухе в любом пространственном положении.

Сущность магнитной пайки заключается в использовании магнитного поля для удержа-

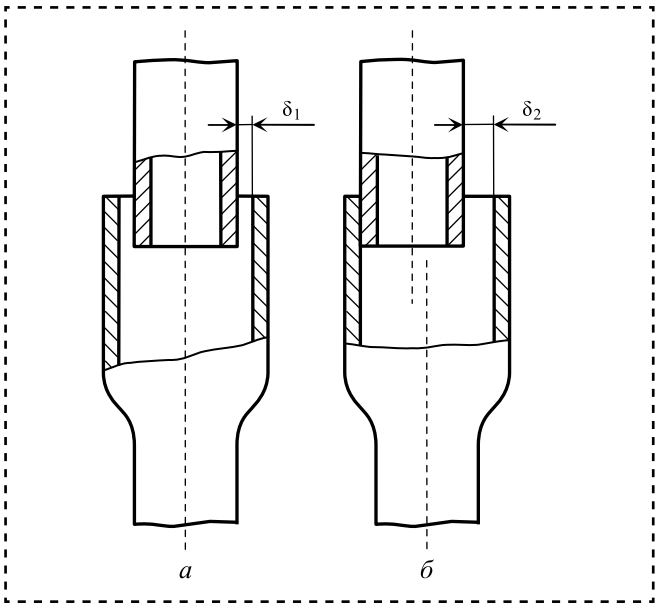


Рис. 8. Варианты расположения трубной заготовки и строительной конструкции (раструба) при сборке трубопроводов диаметром 3/4":
а — без осевого смещения с равномерным зазором δ_1 = 0,15...1,25 мм; *б* — эксцентрично (δ_2 = 0,3...2,5 мм)

* Начало статьи см.в № 5, 2016.

ния металлокерамического припоя в широком паяльном зазоре. Металлокерамический припой состоит из смеси порошков двух сплавов с различной температурой плавления — легкоплавкого и тугоплавкого. При этом наполнитель (тугоплавкая составляющая) имеет точку Кюри выше температуры пайки.

В зазоре между соединяемыми элементами труб из ферромагнитных материалов, заполненном металлокерамическим припоем, наводится магнитное поле. После плавления легкоплавкой составляющей намагниченные частицы наполнителя распределяются равномерно вдоль силовых линий магнитного поля, удерживая легкоплавкую фазу.

При пайке трубопроводных санитарно-технических систем с телескопическими соединениями труб магнитное поле создавали легкими (400 г) и небольшими по размеру постоянными магнитами (рис. 9). Нагревали соединения накидными ацетилено-кислородными горелками, разработанными специально для магнитной пайки [12].

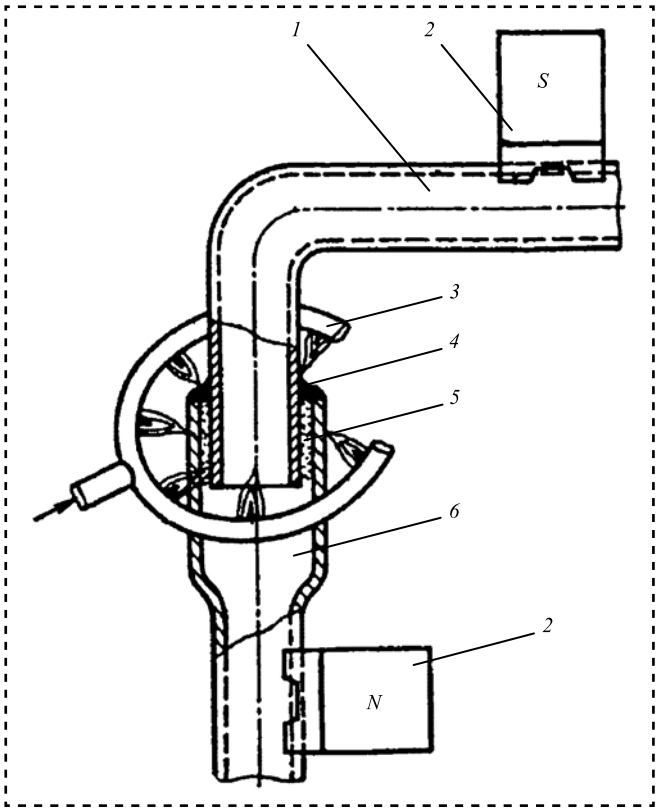


Рис. 9. Схема расположения горелки и магнитов при пайке трубопроводов:

1 — труба; *2* — постоянные магниты; *3* — горелка; *4* — припой-паста; *5* — железный порошок; *6* — труба с раструбом

При пайке применяли припой марки ПАН-3, содержащий легкоплавкую фазу на медно-марганцевой основе и тугоплавкий ферромагнитный наполнитель. В состав припоя вводили флюс (80 % буры и 20 % борного ангидрита), позволяющий паять трубы без предварительной очистки. Наиболее удобно использовать металлокерамический припой в виде пасты, что позволяет механизировать процесс нанесения припоя. Пастообразный припой может самопроизвольно втягиваться в зазор.

Способ магнитной пайки трубопроводов прошел опытно-промышленную проверку при сооружении жилых зданий в Москве еще в 1978 г. При этом производительность труда по сравнению с ранее применяемой газопламенной сваркой возросла более чем в 5 раз [13].

Магнитное поле при пайке трубопроводов можно создавать путем контактирования концов труб с разноименными полюсами постоянного подковообразного магнита или используя электромагнит, при помощи которого можно изменять напряженность магнитного поля в зазоре.

В качестве наполнителя эффективно использование двойных сплавов меди с кобальтом (10...50 %), магнитные превращения которых происходят при 1050 °С. Оптимальное количество вносимого в припой наполнителя составляет примерно 30 %. В качестве легкоплавкой составляющей используют тройные сплавы системы Cu—Mn—Ni, хорошо смачивающие указанный наполнитель при 1000 °С. Время пайки выбирают по началу плавления легкоплавкой составляющей припоя. Окончание процесса определяют по началу усадки расплава в результате жидкофазного спекания, что хорошо фиксируется визуально.

Применение магнитной пайки в условиях строительной площадки позволяет выполнять соединения сантехнических трубопроводов при сборочных зазорах до 3 мм.

В сварочной лаборатории треста "Моссантехстрой-4" успешно проведены работы по применению магнитной пайки для стыковых соединений труб с размещением с их внешней стороны, в месте стыковки, узких стальных колец (ширина 12 мм), изготовленных (выре-

заемых) из стандартных труб. При механических испытаниях на статическое растяжение соединения разрушались по металлу труб.

Особенно эффективен процесс магнитной пайки при низкотемпературной пайке трубопроводов. В качестве наполнителя применяют стальной порошок и используют индукционный нагрев.

Наибольшую протяженность в России имеют газораспределительные сети трубопроводов малых диаметров (до 150 мм), связывающие населенные пункты и промышленные предприятия с магистральными газопроводами. Несмотря на высокие требования по качеству и безопасности газопроводов, их монтаж осуществляется в основном с применением малопроизводительной ручной электродуговой сварки, что и определило низкие темпы строительства и нестабильное качество соединений газораспределительных трубопроводов, особенно в северных и зауральских регионах.

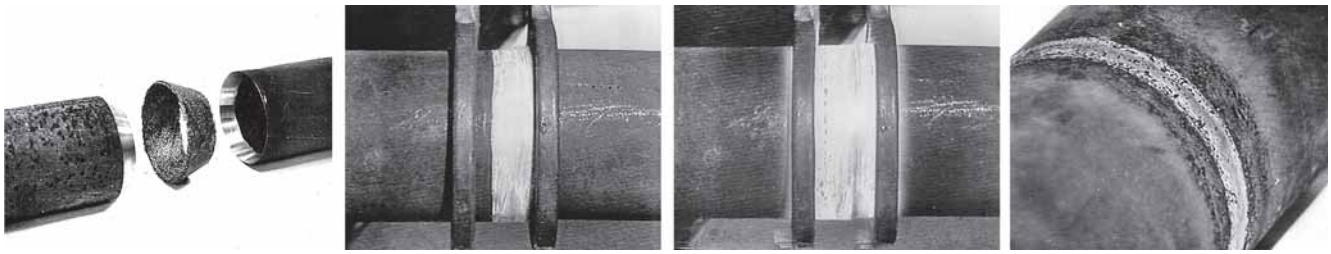
Для повышения темпов газификации и надежности системы газораспределительных газопроводов ВНИИСТ разработан способ соединения труб малого диаметра с применением индукционной пайки и создана опытная передвижная установка для высокоскоростной пайки трубопроводов в полевых условиях (проводили пайку труб сечением 57×5 мм на промыслах Нового Уренгоя). Размещение поста пайки в обустроенном передвижном боксе обеспечивало высокую эффективность работы установки в любых климатических и погодных условиях.

На торцах труб изготавливали совмещаемые косостыковые разделки (рис. 10, *а*), между которыми при стыковке труб зажимали коническое кольцо, сформированное из порошка припоя на железомарганцевой основе марки П87. Этот припой разработан для пайки стальных изделий с широким сборочным зазором (до 1 мм). Температура пайки 1200 °С. На поверхность собранного стыка наносили слой эмали или несколько слоев стеклоленты (рис. 10, *б*). При расплавлении в процессе нагрева при пайке они создают защитное покрытие, удаляющее с поверхности труб в месте пайки оксидные пленки и защищающее соединение от окисления (рис. 10, *в*). Вязкое защитное покрытие, образующиеся на стыке, способствует удержанию жидкого припоя в некапиллярном зазоре и формированию качественной галтели (рис. 10, *г*).

При пайке трубопроводов применяли систему автоматизации нагрева по моменту расплавления припоя в стыке и ультразвуковой метод неразрушающего контроля качества паяных соединений, разработанный в МВТУ им. Н.Э. Баумана [14, 15].

По результатам промышленных испытаний и последующего применения способ индукционной пайки внесен в нормативные документы ВСН 006—89, СНиП 3.05.02—88, СП 42-102—2004, СТО Газпром 2.2-2-496—2010.

Применение припоя марки П87 и разработанной технологии обеспечивает получение равнопрочных паяных соединений труб (рис. 11). Коррозионная стойкость этих соединений в агрессивной среде влажного се-



а *б* *в* *г*

Рис. 10. Индукционная пайка труб с некапиллярными зазорами:
а — положение конических разделок труб и кольца припоя перед сборкой стыка; *б* — собранное соединение с нанесенным на стык защитным покрытием ленточного типа; *в* — соединение в процессе нагрева; *г* — вид соединения после завершения процесса пайки

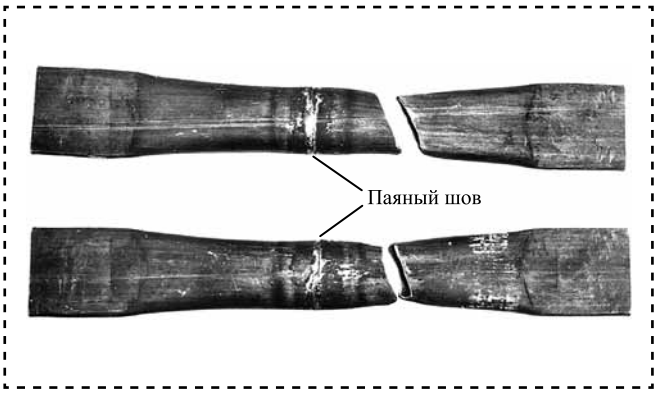


Рис. 11. Образцы паяных соединений труб после испытания на растяжение

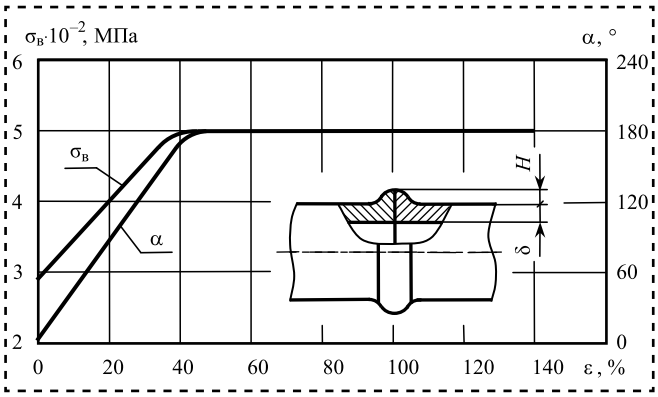


Рис. 12. Изменение прочности $\sigma_в$ и угла изгиба α паяных соединений в зависимости от степени пластической деформации ε в плоскости стыка (ε = (H/δ)·100, %)

роводорода превышает стойкость сварных соединений, поскольку достаточно высокое содержание в припое меди придает паяному шву свойства катода.

В ИЭС им. Е.О. Патона разработан способ высокотемпературной сварко-пайки (а.с. № 1133054) трубопроводных конструкций, позволяющий получать равнопрочные с металлом паяемых труб из низкоуглеродистых сталей стыковые соединения [16]. При этом способе соединяемые трубы с плоскими торцами и с предварительно нанесенным на них припоем в виде пасты или помещенными между ними закладными деталями из припоя в виде колец стыкуются, нагреваются до температуры пайки и осаживаются с приложением осевой нагрузки. При этом пластическая деформация металла труб в области стыка должна составлять не менее 40 % толщины стенки труб.

Остаточную силу на стык при пайке выбирают из условия достижения напряжения текучести металла труб при температуре 1000 °С. Более высокая степень пластической деформации не приводит к заметному повышению механических свойств соединения. Для получения равнопрочного соединения осадка должна составлять 3,6...5,0 мм.

На свойства соединения величина пластической деформации металла труб, которую определяют при заданном давлении осадки параметрами теплового поля в стыке, оказывает решающее значение. Прочность соединения на разрыв и его пластические свойства (при испытании на статический изгиб) повышаются с увеличением степени пластической деформации в плоскости стыка. Максимального значения они достигают при деформации 40 % (рис. 12). Испытания показали, что соединения с пластической деформацией около 40 % обладают достаточной циклической долговечностью при динамических нагрузках.

Капиллярная пайка (без приложения давления) припоями на основе меди обеспечивает прочность стыковых соединений в пределах 250...300 МПа. При пайке припоем на медной основе марки ПАН-3 с приложением осевой силы прочность стыковых соединений может достигать 700 МПа. Подобное увеличение прочности соединений имеет место при пайке встык труб из легированных сталей, прочность которых значительно выше, чем у припоя. При статическом растяжении образцы из сталей 36Г2С и 12Х1МФ разрушаются по металлу труб. При испытании на статический изгиб угол загиба достигает 180°.

При этом способе пайки на свойства соединений большое влияние оказывает особенность кристаллизации припоя под давлением, а также относительно малые толщины паяных швов (3...6 мкм), обусловливающие контактное упрочнение.

При пайке расплавленный припой, взаимодействуя со сталью, интенсивно растворяет ее, обогащаясь железом. Степень такого обогащения зависит от температуры пайки, времени выдержки при этой температуре и толщины слоя припоя.

Содержание железа в шве зависит также от степени пластической деформации. При пла-

стической деформации в 2,2 % массовая доля железа в шве составляет 68 %, а при 39 % деформации достигает 95 %. Повышение содержания железа в шве и снижение содержания компонентов припоя продолжаются и после затвердевания жидкой фазы.

При сварко-пайке припой играет и вспомогательную роль, являясь активизирующим веществом. После расплавления он смачивает соединяемые поверхности труб, очищает их от оксидов и защищает от проникновения кислорода из окружающей среды. При сжатии труб выдавливаемый из зазора жидкий припой уносит с собой остатки флюса и продукты флюсования, обеспечивая высокую плотность паяного шва. Независимо от химического состава припоя он значительно обогащается химическими элементами металла труб, что также способствует упрочнению соединения.

Способ сварки-пайки благоприятно сочетает в себе положительные стороны пайки и сварки давлением. По физической природе процесс сварки-пайки близок к диффузионной сварке с микровакуумированием зоны шва за счет свойств активирующего вещества — припоя.

В ИЭС им. Е.О. Патона создана опытная установка на основе стандартной машины для контактной сварки труб, обеспечивающая зажатие, центровку, индукционный нагрев и осадку труб. Высокая равномерность температурного поля в стыке получается при использовании многофазного индуктора с радиальным магнитным полем (а.с. № 223224). Возникающие магнитные силы в стыке поддавливают расплавленный припой к поверхности торцов труб, что способствует удержанию в некапиллярных зазорах.

В состав пасты, наносимой на кромки труб, входит припой марки ПАН-3, флюс марок ПВ201 или ПВ200, а в качестве связующего используется акриловая смола БМК-5. Исследования проводили при пайке труб типоразмерами 219×10 и 32×4 мм. При сварко-пайке образуется грат, расположенный только снаружи трубы (рис. 13). Контроль образования грата можно использовать при создании системы автоматического регулирования процесса сварки-пайки. Продолжительность процесса сварки-пайки для труб сечением 32 × 4 мм составляет примерно 5 с, а сечением 219 × 10 мм — 20 с.

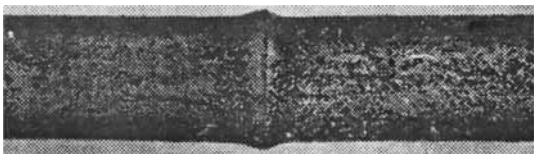


Рис. 13. Паяное стыковое соединение труб диаметром 32×4 мм

Надежность и долговечность трубопроводных систем, эксплуатируемых в условиях воздействия агрессивных сред, в решающей степени зависят от коррозионной стойкости примененных материалов. Проблема защиты от коррозии трубопроводов решается применением защитных металлических коррозионно-стойких цинковых и алюминиевых покрытий.

В последнее время широкое применение, особенно в коммунальном хозяйстве, находят оцинкованные трубы. Однако нарушение цинкового покрытия на трубе при сварке таких труб снижает эффективность его применения и приводит к снижению коррозионной стойкости трубопровода.

Зона нагрева трубопровода при сварке выше температуры плавления цинкового покрытия составляет 35...40 мм. Например, практика эксплуатации систем подачи горячей воды в тепличных хозяйствах показала, что сварные соединения оцинкованных трубопроводов толщиной 1 мм разрушаются из-за местной коррозии в зоне сварного шва через 2...2,5 года.

Сохранение цинкового покрытия при соединении труб может обеспечить способ низкотемпературной пайки, при котором выбираются припои с температурой плавления ниже температуры плавления цинкового покрытия. Наиболее высокую технологическую прочность соединений обеспечивают припои на основе системы цинк—кадмий. Широко применяемый припой ПСК-10 имеет температуру плавления 246...260 °С. Для пайки оцинкованной стали применяют бескислотный флюс на основе мочевины (ФМЦ), который позволяет проводить пайку без нарушения цинкового покрытия. Флюс наносят перед пайкой на соединяемые поверхности в виде пасты на водном растворе [17].

При пайке применяют нагрев токами высокой частоты или газопламенный с использованием ацетилено-кислородного пламени. Основным типом соединения является нахле-

сточное, с применением накладываемой втулки. Такое соединение показало высокие результаты при пайке оцинкованных труб диаметрами 26 и 75 мм с толщиной стенки 2,75 мм. Толщина покрытия составляла 50...55 мкм.

Паяемые поверхности труб перед сборкой подвергают механической очистке металлической щеткой и обезжириванию в ацетоне. Припой в виде кольца помещают по краям муфты или в специальные выточки. Оптимальная величина зазора в стыке 0,10...0,15 мм. Длина нахлестки (муфты) выбирается 5...6-кратной толщине трубы. После пайки остатки флюса удаляют промывкой и протиркой.

Испытания паяных оцинкованных трубопроводов показали, что скорость их коррозии не отличается от скорости коррозии оцинкованных труб как при комнатной температуре, так и при 70 °С. Развитие процессов местной коррозии паяных соединений, в отличие от сварных, не наблюдается.

Прочность соединений из оцинкованных труб, паяных низкотемпературными припоями, существенно зависит от толщины стыкуемых труб. Так, при толщине труб 1,2 мм соединения являются равнопрочными паяемому металлу. Максимальная прочность соединений труб толщиной 2,75 мм, выполненных припоем ПСК-15, составляет 0,6...0,65 от прочности металла труб.

Для толщины соединяемых элементов 1,2 мм при величине перекрытия элементов 7,2 мм за счет пластической деформации происходит выравнивание напряжений по ширине шва. Для труб с толщиной стенки 2,5 мм при величине перекрытия 16,5 мм полного выравнивания не происходит, соединение разрушается ступенчато при пониженном напряжении.

Наиболее высокие показатели по эксплуатационной прочности получены при использовании свинцово-кобальтого припоя с массовой долей кобальта от 10 до 12 %.

Гигиенические исследования процессов сварки и пайки оцинкованных трубопроводов показали, что при пайке выделение аэрозолей примерно в 40 раз меньше, а выгорание покрытия и образование токсичных оксидов цинка примерно в 50 раз меньше.

Положительный результат дал опыт применения низкотемпературной пайки при сооружении оцинкованных трубопроводов в полевых условиях, подающих воду для полива пастбищ, обогрева почвы и теплиц. Применение пайки для соединения трубопроводов позволило использовать трубы с малой толщиной стенки 1,0...1,8 мм взамен труб с толщиной стенки 2,5...3,5 мм, применяемых при сварке.

Пайка применялась при сооружении трубопроводов из оцинкованных спиральношовных труб диаметром 250 мм с толщиной стенок 1,0...2,5 мм. Трубы с толщиной стенки 1,0...1,2 мм имеют эллипсность, овальность и отклонения по размерам сечения до ±2 %, что затрудняет их сборку и не обеспечивает надежного соединения. Для таких случаев разработана технология со специальным телескопическим соединением труб, позволяющая получать качественные паяные соединения (рис. 14). При использовании этой технологии

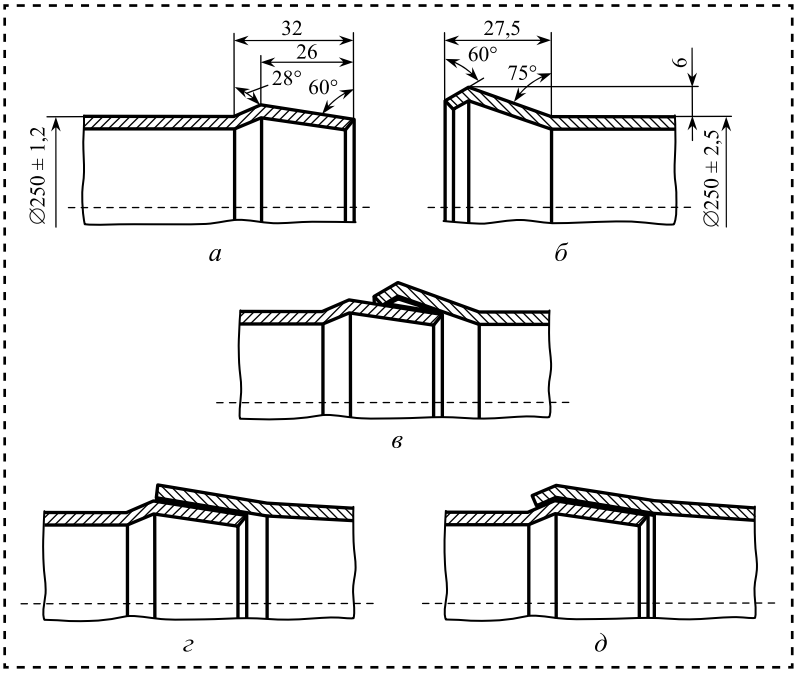


Рис. 14. Телескопическое соединение паяных стыков труб диаметром 250 мм:

а — подготовка концевого участка трубы под внутреннюю посадку; *б* — подготовка концевого участка трубы под наружную посадку; *в* — сборка соединения под пайку; *г* — паяное соединение при толщине стенки трубы 1,2 мм; *д* — паяное соединение при толщине стенки трубы 2,5 мм

проводится предварительная развальцовка концов труб — одной на конус, а ответной — на раструб. В процессе сборки труб прикладывается сжимающая сила 3000...5000 Н. Имеющийся на конце раструба выступ выпрямляется и плотно охватывает образующую конуса. При толщине стенки трубы 2,5 мм этот выступ полностью не выпрямляется и располагается за вершиной двойного конуса, плотно обхватывая его и образуя "замок". Такая технология позволяет получать равномерные зазоры необходимой величины между соединяемыми поверхностями. Пайка проводится либо с предварительным нанесением припоя на соединяемые поверхности методом облуживания, либо с помощью ручной подачи припоя в процессе нагрева при пайке.

При использовании безкислотного флюса марки ФМЦ не требуется промывка соединения после пайки, что важно в полевых условиях. Остатки флюса не увлажняются и не вызывают коррозии. Припой марки ПСК-10 при применении флюса ФМЦ хорошо растекается по цинковому покрытию. Прочность паяного соединения труб на срез — 60...70 МПа. Цинковое покрытие не повреждается, и тем самым сохраняется коррозионная стойкость паяных соединений на уровне стойкости оцинкованных труб. Центровка и сборка труб под пайку проводятся в специальном приспособлении с гидравлической системой, позволяющей соединять трубы с осевой силой сжатия 3000...5000 Н. Гидравлическая система работает от гидросистемы трактора, что обеспечивает возможность проведения сборки и пайки в полевых условиях. Нагрев проводят электрическими или газовыми кольцевыми разъемными нагревателями. Электрический нагреватель радиационного типа обеспечивает равномерный нагрев места пайки и позволяет получать качественные соединения. При использовании газового нагревателя, выполненного в виде кольцевой керамической безпламенной горелки, состоящей из четырех сегментов, трудно получить равномерный нагрев стыка. Проведение нагрева требует применения специальных защитных экранов.

Оцинкованные трубы диаметром 51 мм используют в теплицах для обогрева почвы и помещения. Для этих труб наиболее приемлемым является соединение с помощью муфты с зазорами при сборке 0,15...0,30 мм. Припой-проволока помещается снаружи у паяльного зазора либо в прорезях муфты. Флюс наносится на места пайки до сборки в виде пасты или водного раствора.

При прокладке трубопровода во вновь строящихся теплицах возможно применение простого телескопического соединения типа "труба в трубу" с развальцовкой одного из концов трубы на раструб. Припой располагается в местах нахлестки по торцу раструба.

При пайке труб диаметром 51 мм, как правило, применяют электронагреватели радиационного патронташного типа гибкой конструкции, состоящие из набора пальцевых электронагревателей из двойной нихромовой проволоки диаметром 3,5 мм, надетых на четыре керамические втулки. Нагреватель запитывается напряжением 36 В от сварочного преобразователя постоянного тока или от сварочного трансформатора и потребляет ток до 120 А.

С целью повышения коррозионной стойкости стальных труб в агрессивных промышленных средах на них наносят защитные алюминиевые покрытия, но при сварке под действием высокой температуры сварочной дуги происходит разложение и испарение покрытия, а под силовым воздействием в процессе сборки и сварки — его механическое разрушение и удаление.

Наиболее простым, экономичным и высокопроизводительным является жидкофазный способ нанесения алюминиевого покрытия на стальные изделия — алюминирование. Подготовленные трубы погружают в ванну с расплавленным алюминием. После извлечения труб из ванны на их поверхности образуется слой алюминия под действием сил поверхностного натяжения.

Металлографический анализ показывает, что алюминиевое покрытие состоит из двух слоев — внешнего слоя, состоящего из чистого алюминия, и диффузионного слоя, в котором алюминий в соответствии с диаграммой состояния находится в виде химических соединений (интерметаллидов). Так как при нагреве жидкий тонкий слой чистого алюминия удерживается на поверхности труб силами поверхностного натяжения, а поверхностная пленка оксида алюминия имеет высокую термическую стойкость, что при различных способах

нагрева (кроме индукционного) обеспечивает надежную сохранность покрытия в области соединения труб.

При индукционной пайке алюминированных стальных труб (температура плавления 1200 °С) под действием электромагнитных сил происходит вытеснение из нагреваемой зоны к ее краям слоя алюминия с образованием алюминиевых "валиков". Диффузионный слой при этом сохраняется, но увеличивается его толщина, а также изменяются его форма и структура. Происходит исчезновение столбчатых кристаллитов и образование более равномерного слоя с плавной волнистой границей с паяемым металлом. Диффузионный слой имеет высокую плотность, включения и поры для него не характерны. Химический состав интерметаллидов в диффузионном слое зависит от расстояния до границы с паяемым металлом. На границе образуются интерметаллиды типа Al_2Fe_3, на удалении от нее — Al_3Fe_2 и Al_3Fe.

Такое состояние алюминиевого покрытия после нагрева по термическому циклу высокотемпературной пайки сопоставимо с алитированием (1150 °С) или обработкой стальных изделий парами алюминия (1200 °С), при которых диффузионный слой образуется в результате диффузии алюминия в поверхностный слой металла труб. Однако в отличие от алитированного слоя, состоящего из двух слоев: наружного — хрупкого, пористого и внутреннего — плотного, образуемый при пайке диффузионный слой однороден по толщине.

Плавное изменение твердости при переходе от паяемого металла к внутренней области диффузионного слоя свидетельствует о прочной металлической связи слоя с паяемым металлом. Такой слой обладает высокой жаростойкостью в атмосфере при высоких температурах (до 900 °С) и коррозионной стойкостью в средах, содержащих сернистые соединения.

Процесс алитирования широко применяется для создания защитного покрытия на трубах из углеродистой и легированной стали (например, 36Г2С).

Алюминиевые покрытия препятствуют растеканию припоев по поверхности труб, что создает условия для формирования усилений на наружных участках шва. Следовательно, образующаяся при индукционной пайке в области соединения структура алюминиевого покрытия обеспечивает высокие механические и коррозионные свойства паяных соединений. Срок службы алюминиевого покрытия 35—50 лет.

Одним из способов надежной защиты промышленных стальных трубопроводов от воздействия агрессивных сред и повышения их долговечности является нанесение на поверхности стальных труб эмалевых покрытий, разработкой которых, а также технологией их нанесения с 1961 г. занималась лаборатория эмалирования во ВНИИСТ (Москва). Технология эмалирования труб на станках-автоматах с использованием индукционного обжига покрытий на XIX Международном салоне по новым технологиям в Женеве отмечена золотой медалью.

Эмалированные трубы широко применяют в нефтяной, химической, энергетической промышленности, при сооружении промысловых трубопроводов, работающих в высокоагрессивных средах на нефтяных промыслах, строительстве теплотрасс и топливопроводов [18].

При транспортировке нефти, газа, воды и агрессивных продуктов скорость коррозии внутренней поверхности стального трубопровода часто значительно выше скорости почвенной коррозии наружной поверхности трубопровода. В этих случаях важной задачей является защита от коррозии внутренней поверхности трубопровода.

Эмалевое покрытие представляет собой композицию на основе силикатов, которая надежно работает при температурах от −50 °С до +350 °С. Толщина эмалевого покрытия составляет 300...500 мкм. Наиболее эффективными являются безгрунтовые эмали марок МК-5 и МК-5Р. Для транспортировки обводненной нефти с большими примесями сероводорода созданы кислотостойкие эмали марок № 8 и 16. ЗАО "Пегас" выпускал стальные трубы с эмалевым покрытием на внутренней поверхности диаметрами 89...426 мм.

Режимы электродуговой сварки при соединении труб отрицательно влияют на состояние эмалевого покрытия — эмаль подвергается сильному температурному воздействию, выгорает и разрушается. В околошовной зоне изменение структуры эмали зависит от максимальной температуры сварочной ванны.

В зоне термического влияния (ЗТВ) в эмали происходят физико-химические реакции, приводящие к разрушению покрытия. Чем больше тепловложения, тем сильнее разрушается эмалевое покрытие. После сварки структура металла в ЗТВ неоднородна, вследствие чего изменяются условия взаимодействия металла с эмалью. После затвердевания эмали в покрытии могут образоваться поры, пузыри, микро- и макротрещины. Последствием воздействия на эмаль термического цикла сварки является нарушение сплошности покрытия в околошовной зоне и его отслоение.

Особенностью эмалевого покрытия является его относительно низкая теплостойкость (800...900 °С), что ограничивает применение эмалированных труб для соединения их с помощью сварки. Теплоустойчивость эмалевого покрытия зависит также от длительности его пребывания при высокой температуре. Так, допустимое время пребывания эмали при 900 °С составляет 4 мин, а при 1200 °С — 50 с. При сварке длительность пребывания эмалевого покрытия при температуре плавления стали не должна превышать 2...3 с. Такой режим нагрева может быть обеспечен при автоматической шаговой импульсно-дуговой сварке многослойными швами. Этот способ сварки путем кратковременного периодического нагрева и охлаждения свариваемого соединения имеет широкие возможности регулирования теплового состояния свариваемого соединения. При этом качество слоя защитной эмали под сварным соединением определяется условиями его нагрева и охлаждения.

Наиболее эффективным способом соединения эмалированных труб с сохранением качественного покрытия в области соединения является высокотемпературная пайка. При этом способе тепловое состояние паяемого соединения регулируют в широком диапазоне путем подбора припоя с необходимой температурой плавления и, соответственно, пайки. В процессе пайки эмалевое покрытие участвует в технологическом процессе образования паяного соединения, выполняя роль защитного покрытия. Оно защищает паяемое соединение от воздействия атмосферы, удаляет оксидную пленку в месте образования паяного соединения, а также способствует удержанию расплава припоя в зазоре стыка [19].

Растекание припоя по поверхности стыкованных участков труб приводит к самоотслаиванию покрытия при охлаждении стыка, что позволяет беспрепятственно проводить визуальный контроль качества соединения (см. рис. 10, *г*).

При выборе или синтезе состава эмалевого покрытия для эмалирования поверхности трубопровода или для защиты паяемого стыка необходимо учитывать механизм сцепления покрытия с поверхностью труб и механизм самоотслаивания покрытия от паяного стыка [20].

Во ВНИИСТ разработаны техника и технология эмалирования сварных соединений трубопроводов в полевых условиях [21]. При индукционной пайке процессы формирования паяного соединения и эмалирования стыков труб совмещены и выполняются одновременно на одном оборудовании.

Библиографический список

12. **Белов И.П.** Опыт внедрения магнитной пайки трубопроводов систем отопления // Сварочное производство. 1983. № 11. С. 21—22.

13. **Опыт** применения высокотемпературной пайки труб при строительстве жилых зданий / В.К. Лебедев и др. // Автоматическая сварка. 1979. № 10. С. 49—51.

14. **Алешин Н.П., Медведев В.А.** Ультразвуковой контроль процесса пайки // Неразрушающие физические методы и средства контроля. Материалы XI Всесоюзной конференции. Москва, 1987.

15. **Медведев В.А.** Ультразвуковой контроль паяных соединений в процессе изготовления // Дефектоскопия. 1987. № 8.

16. **Лебедев В.К., Табелев В.Д., Письменный А.С.** Стыковая пайка под давлением стальных трубопроводов // Автоматическая сварка. 1983. № 9. С. 25—28.

17. **Полякова В.М.** Пайка тонкостенных трубопроводов из оцинкованной стали // Сварочное производство. 1976. № 4.

18. **Теория,** практика, перспектива производства труб, покрытых эмалью / Н.А. Гукасов и др. Москва, 2000. 122 с.

19. **Карабанов В.В., Азовкина М.Г., Бохоров И.О., Хоменко В.И.** Разработка защитного покрытия при индукционной пайке стыков трубопроводов на воздухе // Сварочное производство. 1990. № 1. С. 8—9.

20. **Яценко Е.А.** Стеклокомпозиционные технологические покрытия для защиты некоррозионно-стойких сталей при термической обработке: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1993.

21. **Подклетов Е.Н., Сиротинский А.А.** Эмалирование труб и резервуаров на станках-автоматах // Строительство трубопроводов. 1973. № 6. С. 20—22.

УДК 539.21; 539.621

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

Потоки подобных частиц без диссипации энергии*

Исследовано влияние технологии получения на свойства покрытий, наносимых ионно-плазменными методами. Обнаружено явление переноса частиц без диссипации вдоль эквипотенциальных поверхностей с постоянными энергетическими барьерами, определяемых формой и структурой кристаллических поверхностей в диссипативных системах. Осуществление такого переноса вещества возможно по эквипотенциальным поверхностям слоистого анизотропного твердого тела с изоэнергетическими уровнями выше уровня Ферми и ниже зоны проводимости, где образуется соответствующая энергетическая щель.

Установлено существование подобия между элементарными частицами. Определены критерии, отвечающие за подобие элементарных частиц и исследованных физических явлений. Сверхнизкое трение, сверхпроводимость, сверхтекучесть, рост покрытий в вакууме, термоэлектричество являются подобными явлениями переноса вещества без диссипации энергии.

Influence of technological parameters on properties of the coverings put with ion-plasma methods is investigated. The phenomenon of transfer of particles without dissipation along the equipotential surfaces with constant power barriers determined by a form and structure of crystal surfaces in dissipative systems is revealed. Implementation of such transfer of substance is possible on equipotential surfaces of a layered anisotropic solid body with isoenergetic levels higher than the level of Fermi and conductivity zones where the corresponding power crack is formed are lower.

Existence of similarity between elementary particles is established. The criteria which are responsible for similarity of elementary particles and the studied physical phenomena are defined. The ultralow friction, superconductivity, superfluidity, growth of coverings in vacuum, thermoelectricity are the similar phenomena of transfer of substance without energy dissipation.

Ключевые слова: вакуумные ионно-плазменные методы, покрытия, частица, атом, рост кристаллов, электронографические и электронно-микроскопические исследования, сверхпроводимость, сверхтекучесть, сверхнизкое трение, потоки без диссипации энергии, броуновское движение, фрактальные поверхности, подобие.

Keywords: vacuum ion-plasma methods, coatings, particle, atom, crystal growth, electron diffraction and electron microscopy studies, superlow friction, superconductivity, superfluidity, flows without dissipation of energy, fractional Brownian surface, similarity.

Создание подобных частиц

Электрон. Критерий подобия для элементарных частиц — это безразмерная величина, составленная из размерных физических параметров [16—18]. В стандартной модели элементарных частиц принято, что лептоны и кварки являются бесструктурными образованиями, или точками. В то же время известно наличие у электрона классического и комптоновского радиусов [12—13], что подразумевает существование определенной структуры электрона. Объяснение природы данных явлений следует искать в природе элементарных частиц и их строении. Далее для простоты вычислений будем использовать относительную единицу энергии, которая соответствует потенциальной энергии электрона.

В рассматриваемой модели термин принцип суперпозиции подразумевает аддитивность полей, создаваемых источниками, в свою очередь аддитивными, и применяется к теориям, основные уравнения которых линейны. Рассмотрим строение свободного электрона.

* По материалам доклада на конференции "Трибология — машиностроению—2014".

Начало статьи см.в № 5, 2016.

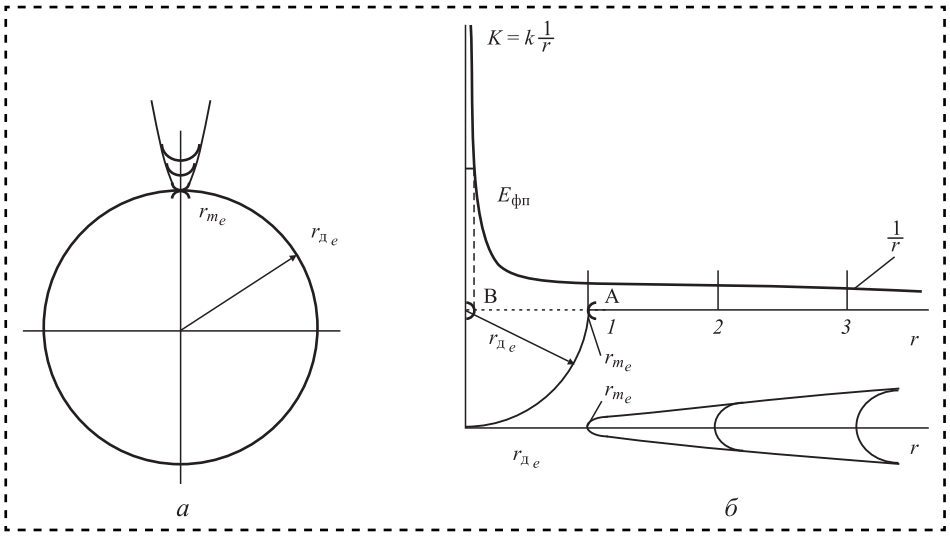


Рис. 10. Строение электрона (*а*) и поля электрона (*б*)

Электрон и среда (рис. 10), в которой он находится, включают несколько экспериментально измеренных параметров: r_{m_e} — классический радиус электрона (радиус Лоренца или длина томсоновского рассеяния); $r_{д_e}$ — комптоновский радиус электрона; c_0 — скорость света; α — постоянная тонкой структуры; $\lambda_{д_e}$ — комптоновская длина волны; h — постоянная Планка; $\nu_{д_e}$ — частота колебаний электрона; q — заряд [12, 13]. Существует еще одно квантово-механическое свойство частицы — спин S, равный произведению постоянной Планка h на 1/2 или 1. Постоянная тонкой структуры α играет важнейшую роль в построении физического подобия элементарных частиц и является критерием подобия. Формула комптоновской длины волны получается из формулы дебройлевской длины волны $2\pi r_{д_e}$, путем замены скорости частицы v на скорость света c_0 [12, 13]:

$$\lambda_{д_e} = h/m_e c_0. \qquad (9)$$

Радиус r_{m_e} (см. рис. 10, *а*), определяет массу электрона

$$r_{m_e} = \mu_0 q^2/4\pi m_e. \qquad (10)$$

Формулу (10) также можно получить следующим рассуждением. Если две заряженные частицы находятся в поле друг друга, энергия их взаимодействия подчиняется закону Кулона

$$E_k = q^2 c_0^2/4\pi\varepsilon_0 r_k, \qquad (11)$$

где r_k — расстояние между частицами;

ε_0 — электрическая постоянная;

$1/\varepsilon_0\mu_0 = c_0^2$, т.е. величина, обратная произведению электрической ε_0 и магнитной постоянной μ_0, равна скорости света во второй степени.

Преобразуем закон Кулона через энергию взаимодействия частиц и применим теорию размерности и принцип суперпозиции, получим потенциальную энергию электрона

$$E_e = \mu_0 q^2 c_0^2 / 4\pi r_{m_e}. \qquad (12)$$

Момент количества движения частицы (постоянная Планка)

$$h = m_e c_0 \lambda_{д_e}. \qquad (13)$$

Тогда из формул (11—13) получаем потенциальную энергию электрона

$$E_0 = \mu_0 q^2 c_0^2/4\pi r_{m_e} = m_e c_0^2. \qquad (14)$$

Отсюда определяем

$$E_0 = \mu_0 q^2 c_0^2/4\pi r_{m_e} = \\ = \mu_0 q^2 c_0 r_{д_e}/4\pi r_{m_e} t_{д_e} = \mu_0 q^2 c_0 \nu_{д_e}/4\pi\alpha. \qquad (15)$$

Тогда постоянная Планка

$$h = m_e c_0 \lambda_{д_e} = \mu_0 q^2 c_0 \lambda_{д_e}/4\pi r_{m_e} = \\ = \mu_0 q^2 c_0/4\pi\alpha. \qquad (16)$$

Масса частицы сосредоточена в длине волны томсоновского рассеяния, движущейся по комптоновского радиусу. Следовательно, отношение классического радиуса электрона r_{m_e} к комптоновскому радиусу электрона $r_{д_e}$ равно α.

Частица обладает электромагнитным полем (с отрицательной кривизной у электрона и положительной у позитрона) (см. рис. 10, *б*), которое распространяется от комптоновского радиуса волны частицы $r_{д_e}$ и вращается со скоростью c_c по радиусу волны Комптона вокруг центра частицы. Далее скорость его вращения c_{c_R} увеличивается пропорционально расстоянию R от центра вращения, а энергия уменьшается согласно кулоновскому закону пропорционально $1/R$.

Отличительной характеристикой такого поля является практически линейное убывание гиперболической кривой $1/r$ более 1 (условной единицы массы) и увеличение скорости роста менее 1. Функции $1/r$ стремятся к нулю. Например, сжатие электрона при движении для получения энергии в $1/\alpha$ (137,036 электронных единиц энергии) большей потенциальной энергии электрона требуется сжатие от 1 до 0,007297 относительных электронных единиц (кривизна 1 соответствует потенциальной энергии электрона). На рис. 10, *б* показано такое сжатие при перемещении из положения *A* в положение *B* комптоновского радиуса частицы $r_{\text{д}e}$. При этом энергия электрона увеличивается в $1/\alpha$ (137,036 электронных единиц) и соответствует энергии фазового перехода электрона в новое состояние. Для получения следующей порции энергии, равной α, такой же величины необходимо сжатие от 0,007297 до 0,0036616. Отсюда следует, что в этом диаметре возможно размещение двух подобных частиц вместо одной. Направление вектора скорости вращения поля c_c составляет 90° к плоскости кривизны поля. Соотношение между комптоновского радиусом $r_{\text{д}e}$ и радиусом массы r_{m_e} равно постоянной Зоммерфельда (или постоянной тонкой структуры) α [12, 13], которая и определяет геометрию частиц. Эта величина α является критерием подобия для элементарных частиц и определяет размещение частиц в энергетических щелях при движении без диссипации.

Масса частицы имеет конечную величину и определяется радиусом r_{m_e}, расположенном на комптоновского радиусе $r_{\text{д}e}$ (см. рис. 10). Независимо от кривизны кривой вблизи точки нуля и массы частицы, которая может весьма существенно превосходить массу электрона, в точке 1 заряд любой частицы соответствует единичному заряду электрона.

Кроме того, положительные и отрицательные электрические поля (рис. 11) имеют соответственно положительную кривизну геометрии типа "сфера Римана" и отрицательную кривизну геометрии типа "седло Лобачевского". Эти пространственные поля зеркально симметричны и обладают одинаковыми свойствами. Наложение таких полей (рис. 11, *б*) приводит к формированию поля с прямоугольной геометрией Евклида (квазиевклидовой геометрией).

Среда. Свойства частиц определены свойствами среды. Элементарная частица электрон с электромагнитным полем (рис. 10, *б*) находится в среде, формируемой полями других частиц, и среда определяет подобие параметров и характеристики (массу $1/r_{m_e}$, волновой радиус $r_{\text{д}e}$, спин

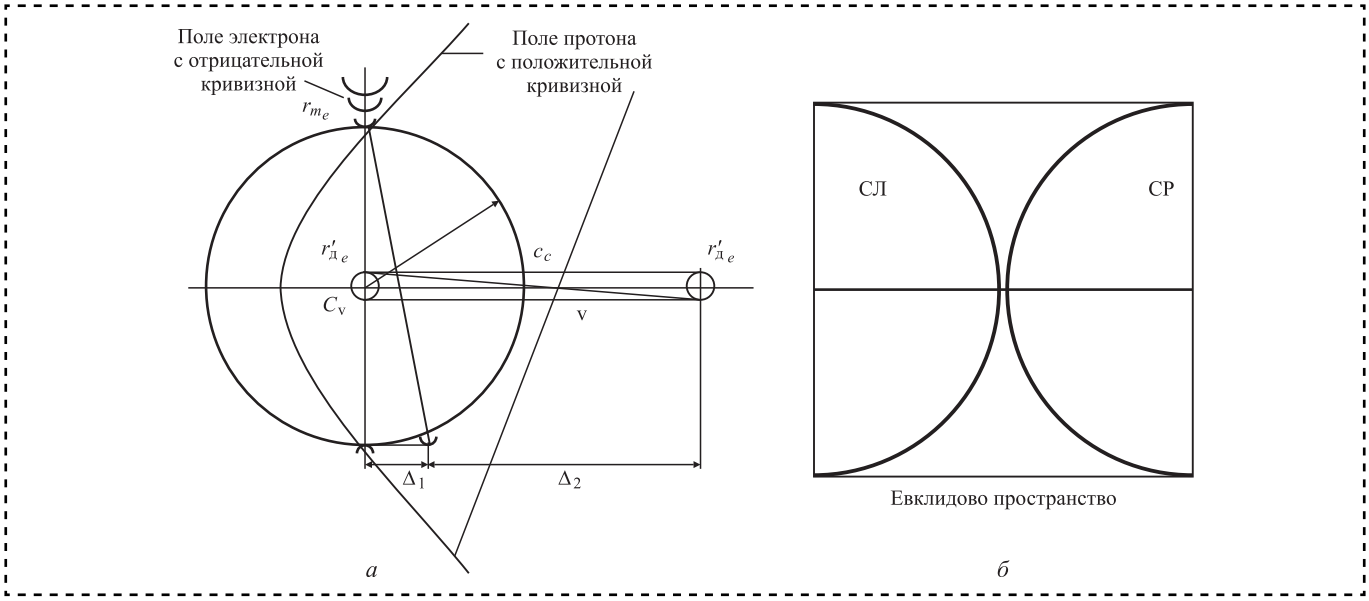


Рис. 11. Взаимодействие частиц и полей:
а — движение электрона в поле протона; *б* — сложение поля Лобачевского (типа "седло", СЛ) с отрицательной кривизной и поля Римана (типа "сфера", СР) с положительной кривизной образует прямоугольную геометрию Евклида

$1/2h$) частицы. В рассматриваемой модели термин "принцип суперпозиции" подразумевает аддитивность полей, создаваемых источниками, в свою очередь аддитивными, и применяется к теориям, основные уравнения которых линейны. Плотность среды определяется наличием аддитивности поля (суммарным количеством массы поля в единице объема среды). Суммарные поля всех частиц являются аддитивным и формируют среду с элементами подобия, в которой находятся другие подобные друг другу и среде элементарные частицы. Рассмотрим частицы, которые подобны друг другу и соответствуют элементам подобия среды. В основе графика изменения энергии взаимодействия лежат дробно-линейные функции (кривые $1/r$ типа гиперболы). Суммарное поле всех частиц определяет плотность среды, 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. Рассмотрим среду согласно принципу суперпозиции. Среда в точке характеризуется кривизной k_r с радиусом r_c и плотностью ρ, которая формируется из полей элементарных частиц и является суммой радиусов кривизны этих полей $1/r_{m_e} = \Sigma 1/r_{m_i}$, которая и определяет величину скорости света, как скорость движения суммы полей $1/c_c = \Sigma 1/c_{c_i}$. Математически скорость света c_c является пределом суммы ряда полей всех частиц в данной точке. Передача взаимодействия происходит за временной промежуток $t_{\text{д}e}$:

$$t_{\text{д}e} = r_{\text{д}e}/c_0,$$

где c_0 — измеренная скорость света.

За это время $t_{\text{д}e}$ происходит формирование и обновление всех систем, состоящих из таких частиц, что является подобием системы с одинаковой тактовой частотой. Отсюда следует постоянство частоты колебаний $\gamma_{\text{д}e} = 1/t_{\text{д}e}$. Строение таких частиц со смещенным центром масс полностью согласуется с представлениями об облаке вероятности электрона [12, 13].

Взаимодействие и движение частицы под действием кулоновского поля осуществляется по правилу треугольника (см. рис. 11):

$$c_c^2 = c_{c_\text{v}}^2 + \text{v}_\text{v}^2. \qquad (17)$$

Приоритет взаимодействия определяется по закону Кулона с ближайшей частицей в виде ориентационного взаимодействия. Рассмотрим движение отрицательного электрона в положительном поле протона (см. рис. 11, *а*). При движении к протону электрон сжимается поперек оси движения с превращением в структуру типа спирали с правовинтовым движением. Положительный поток поля протона обладает свойством свободного прохождения через электрон с одновременной ориентацией отрицательного поля электрона в положительном поле в виде зеркального отражения. Вектор скорости света c_c сохраняет свою величину и распадается на два вектора c_{c_v} и v_v.

В пределе скорость правовинтового спиралевидного движения частицы v стремится к скорости света $2\pi c_0$. Энергия движущейся частицы выражается следующим образом:

$$m_{e_\text{v}}^2 c_{c_\text{v}}^2 = m_{e_0}^2 c_c^0 + m_{e_\text{v}}^2 \text{v}^2, \qquad (18)$$

где m_{e_0} — масса покоящегося электрона; m_{e_v} — масса движущегося электрона.

Тем самым приходим к уравнению, подобному преобразованию Лоренца для движущегося тела с использованием не линейной, а синусоидальной скорости света c_c. Движущийся объект (частица) при движении сжимается, собственная скорость c_{c_v} вращения частицы уменьшается с пропорциональным ростом скорости v. При этом скорость движения частицы никогда не превысит синусоидальную скорость света c_c. Поток поля протона с положительной кривизной вызывает перекрестное движение частицы под углом 90° к потоку поля. Движущийся электрон с ростом скорости превращается в подобие правовинтовой спирали, длина спирали в пределе становится равной $2\pi r_{\text{д}e}$, и при соотношении длины спирали к ее радиусу, равной α, возникает возможность поглощения двух нейтрино и превращения электрона в частицу мюон μ по реакции $\mu \to e + \nu_\mu + \nu_e$. Согласно гипотезе Лоренца—Фицджеральда о сокращении тел при движении в эфире, сокращение размеров происходит в направлении движения к неподвижному наблюдателю или от него. В случае движения электрона такое сокращение вдоль оси перемещения приводит к превращению электрона в эллипсоид. Однако изменение по-

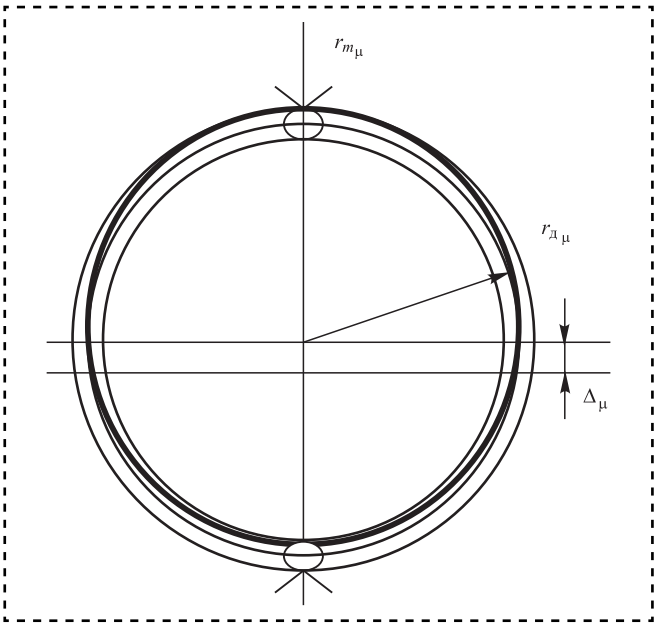


Рис. 12. Мюон

перечных размеров электрона с превращением его в спираль позволяет получить из электрона (позитрона) другие частицы, превращая их в стоячую волну при вращении вокруг центра с сохранением подобия между электроном и созданными частицами (рис. 10—12).

Мюон. Рассмотрим процесс формирования мюона μ^- и античастицы μ^+ из элементарных частиц — электрона и позитрона. С математической точки зрения пространства с положительной и отрицательной кривизной являются полными аналогами. Такие поля частиц стремятся к слиянию противоположных зарядов в каждой точке и нейтрализации, т.е. противоположному расположению радиусов кривизны. Представим, что электрон (или позитрон) находится в поле другой частицы, расположенной от него на расстоянии R. Под влиянием поля такой частицы у электрона (или позитрона) на каждый оборот формируется сдвиг Δ_v пропорционально кривизне поля и радиус кривизны поля частицы разворачивается под 90° зеркально к касательной радиуса кривизны частицы с противоположным зарядом. Для получения следующей порции энергии такой же величины необходимо сжатие от α (0,007297) до 2α (0,0036616). В этом диаметре возможно размещение двух подобных частиц. Тем самым мюон μ представляет собой осциллятор с частотой колебаний, кратной α, совершающий колебания поля по кардиоиде, и подобен электрону. Реальная скорость света как синусоидальной волны равна $2\pi c_0$ при измеренной скорости света [12, 13] как четыре радиуса де Бройля на полную синусоиду одного колебания. Масса мюона тогда равна $1/2\ \pi\alpha - 2\pi - \Delta$ масс электрона. Такая частица должна обладать правовинтовым движением в одной плоскости со средней скоростью c_c и направлением вектора скорости вращения поля 90° к плоскости кривизны поля. Учитывая возникающее при формировании такой частицы правовинтовое движение типа кардиоиды, масса частицы должна уменьшаться дополнительно на величину Δ_μ и становиться равной 206,8 масс электрона.

Фотон (рис. 13) — это составная частица из двух разноименно заряженных частиц, каждая с массой 1/2 от массы фотона при одинаковом волновом радиусе де Бройля у обеих частиц, что в сумме составляет постоянную Планка h. Для сравнения, электрон с энергией, равной фотону, будет иметь радиус кривизны массы в 2 раза меньше радиуса кривизны массы одной частицы в фотоне такой же величины энергии. Источником излучения фотонов являются атомы и молекулы, поэтому фотон также обладает правовинтовым движением и зеркально отражает движение электрона и протона в атоме, и имеет поляризацию в пространстве. Отношение радиуса первой боровской орбиты электрона в атоме водорода (комптоновский радиус атома водорода $r_{д_a}$) длине дебройлевской волны фотона $r_{д_ф}$, излученного этой орбиты с радиусом атома длиной волны, равно α. Рассмотрим превращение частиц $e^- + e^+$ в излучение (аннигиляции) (рис. 13, *б*) и излучение фотона атомом вещества (рис. 13, *в*). 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 углами 120° соответственно. Такая реакция взаимодействия электрон-позитронной пары приводит к возникновению двух (или трех) фотонов с энергией, равной энергии электрона и позитрона $e^- + e^+ \to \gamma + \gamma$. Спин фотона равен 1, в отличие от спина 1/2 остальных

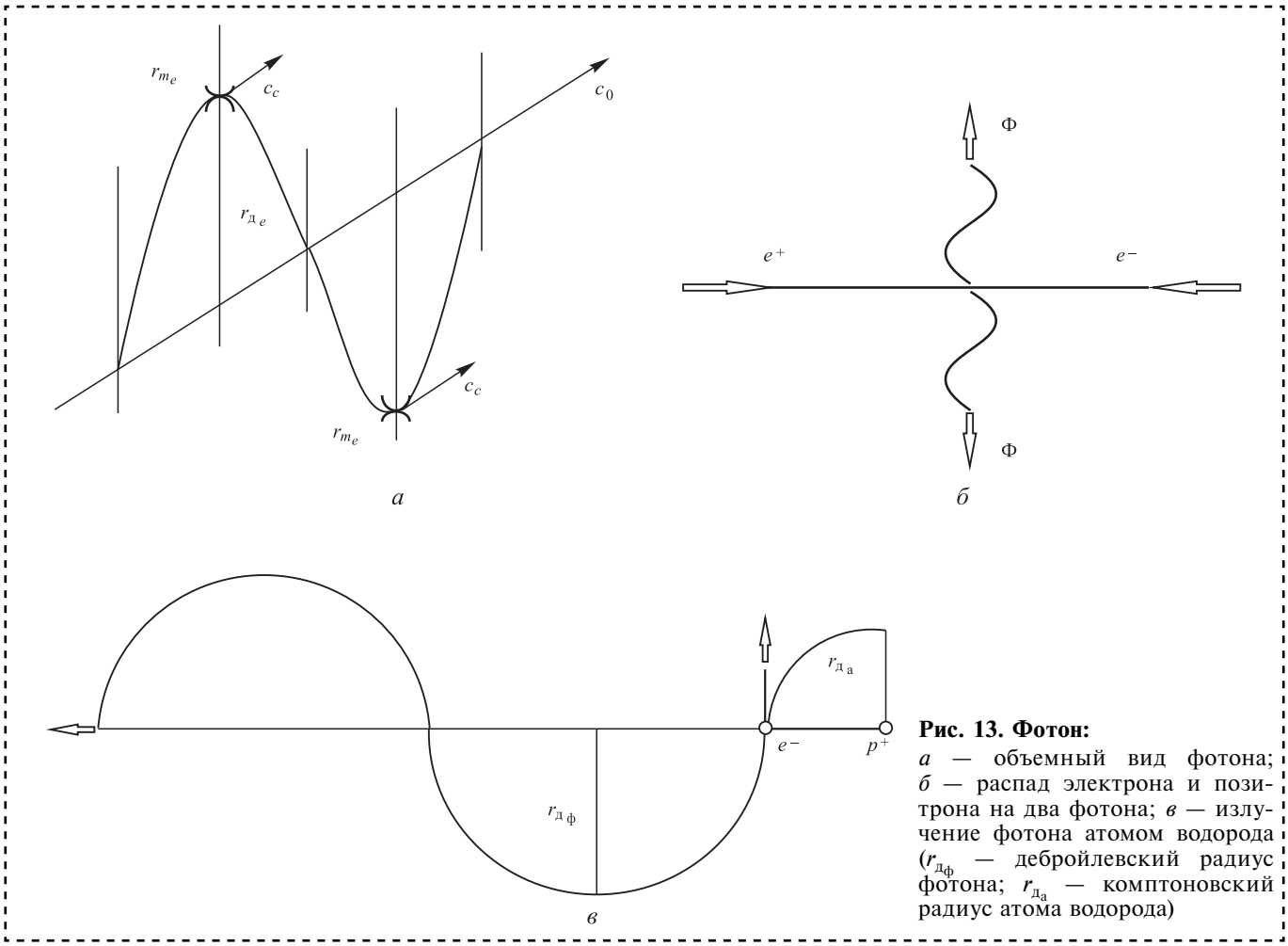


Рис. 13. Фотон:
а — объемный вид фотона; *б* — распад электрона и позитрона на два фотона; *в* — излучение фотона атомом водорода ($r_{д_ф}$ — дебройлевский радиус фотона; $r_{д_а}$ — комптоновский радиус атома водорода)

частиц, даже состоящих из двух и более элементарных составляющих типа кварков. Коэффициент подобия между частицей (атомом водорода) и фотоном равен $r_{д_a}/r_{д_ф} = \alpha$ (постоянной тонкой структуры) (рис. 13, *в*). Фотон и нейтрино участвуют в образовании частиц и служат для переноса вещества и энергии.

Соотношение между перекрестными потоками разной природы, например, потоками тепла и частиц соответствует принципу взаимности Л. Онзагера и позволяет установить геометрическую взаимосвязь между перекрестными потоками тепла и частиц. Возникновение потока фотонов возможно под прямым углом либо 60° в зависимости от ориентации спинов (рис. 13, *б*).

Пион — π^0 частицы с зарядом 0 и π^- (π^+) с зарядом 1 пион и спином 0.

Нейтральный пион π^0 образуется из двух частиц и является аналогом фотона. При этом колебания осуществляются, как и в случае мюона, по кривой типа кардиоиды, которая делится на две частицы с разноименным зарядом Q и спином 1/2. Две частицы существуют как одна целая с нейтральным зарядом. В таких частицах также сохраняется правовинтовое движение. Однако в силу того, что такая частица состоит из двух частиц после деления с массой 1/2, то суммарная масса возникшей частицы равна не сумме двух масс мюона 1/2, а сумме масс двух сжатых частиц после деления, с уменьшенным до α суммарным поперечным сечением колебаний на орбите с волновым комптоновским радиусом пиона $r_{д_\pi}$. Структура геометрии пионов подобна мюону с критерием подобия α (см. рис. 12). При симметричном расположении двух масс частиц на расстоянии, кратном α^{-1} от центра малой окружности, образующей кривую типа кардиоиды при движении по волновому комптоновскому радиусу пиона, происходит наложение их полей друг на друга с формированием коллективного нейтрального поля. Кривизна такого поля при удалении от центра

пиона становится равной суммарной кривизне электрона. Скорость движения двух масс пиона по кардиоиде в среднем равна орбитальной скорости света c_c. С учетом правовинтового движения происходит изменение массы в сторону уменьшения с 137,036 на каждую частицу до 132,05, дающих в сумме 264,1 электронных единиц массы.

Частицы с дробным зарядом π^- или π^+ также образуются при делении двух одноименно заряженных частиц. Подобно пиону π^0 с нейтральным зарядом π^- или π^+ имеют симметричное расположение двух масс одноименно заряженных частиц на расстоянии, кратном α^{-1} от центра малой окружности, образующей кардиоиду при движении по волновому радиусу частиц, составляющих пион. Происходит наложение полей двух составляющих π^- или π^+ частиц с формированием коллективного поля с кривизной на удалении от центра такой частицы, равной кривизне и заряду электрона. Скорость движения двух масс пиона по кардиоиде также равна орбитальной скорости света c_c. Однако две частицы π^- или π^+ не могут являться полностью симметричными относительно центра согласно принципу запрета Паули нахождения двух и более тождественных частиц с одинаковыми квантовыми состояниями на одной орбите, и поэтому одна частица с 1/2 заряда смещена с орбиты пропорционально α. Подобное смещение происходит в атоме для двух электронов одной *s*, *p*, *d* или *f*-орбитали, вызывая тонкое расщепление спектральных линий одного уровня энергии электронов. При этом происходит наложение их полей друг на друга с формированием коллективного поля с кривизной на удалении от центра такой частицы, равной суммарной кривизне и заряду электрона. Это смещение приводит к увеличению суммарной массы пиона до 273,1 масс электрона. Такая частица является аналогом электрона.

Протон $\mathbf{p}^+$ состоит из двух положительных частиц и одной отрицательной частицы (названных кварками), полученными в результате деления e^+ и e^- на частицы с суммарным спином 1/2 и дробными зарядами (рис. 14) [7, 8, 20].

Энергия протона, состоящего из трех частиц (кварков), равна 938,272046(21) МэВ, что составляет 1836,15267389(17) электронных единиц энергии. Тогда на отрицательный кварк приходится 917,0763 электронных единиц энергии, а на положительные кварки — 919,0763, на каждый положительный кварк приходится 1/2 от энергии кварка 459,53815 электронных единиц энергии. При сложении отрицательной и положительной кривизны масс трех кварков остаточная кривизна составит кривизну электрона с соответствующим единичным зарядом. Разница составляет кривизну единичного заряда Q^+. Отрицательная кривизна на одну единицу превышает положительную кривизну двух кварков $(m^+ + m^+) - m^- = 1$. Кварки вращаются вокруг центра с правовинтовым движением (см. рис. 15) на расстоянии α^- от центра частицы по радиусу $r_{\text{д}_p}$ (равному $r_{\text{д}_e}$ — комптоновскому радиусу электрона).

Геометрия протона полностью подобна геометрии электрона. Сумма комптоновской длины волны трех кварков кратна α и равна $r_{\text{д}_p}$. Такой отрицательно заряженный кварк компенсирует нарушение симметрии положительно заряженного протона и приводит к формированию симметричной частицы, по своим свойствам аналогичной электрону. Суммарное поле такой частицы дает кривизну, равную кривизне электрона при удалении от геометрического центра протона, что обеспечивает постоянство заряда протона и равенство его заряду электрона. Наличие отрицательного кварка в центре протона объясняет тот факт, что отрицательно заряженный электрон никогда не "упадет" на

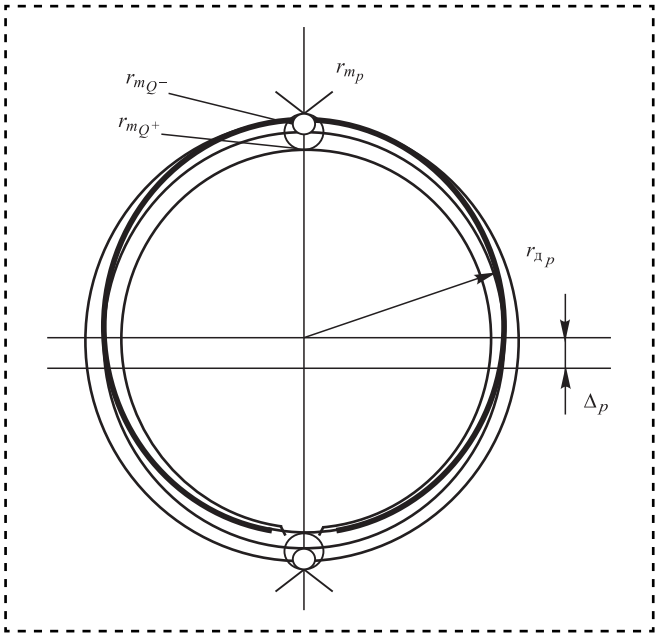


Рис. 14. Протон

ядро атома в силу отталкивания отрицательного заряда центрального кварка. Геометрически протон также кратен постоянной тонкой структуры α. Средняя скорость вращения c_c поля вдоль волнового радиуса r_c для всех частиц подобна и растет с ростом радиуса r_c.

В протоне вблизи центра масс образуется область с отрицательным зарядом от отрицательной частицы $r_{Д_{Q^-}}$ с наибольшей массой и наименьшими размерами, и двумя вращающимися вокруг него кварками с положительным зарядом $r_{Д_{Q^+}}$. Суммарная кривизна двух положительных частиц $2r_{Д_{Q^+}}$ и одной отрицательной $r_{Д_{Q^-}}$ в протоне составляет относительную единицу энергии электрона $r_{m_{e^+}}$ (соответствует потенциальной энергии электрона), что определяет единичный заряд протона.

Нейтрон n^0 также состоит из трех частиц-кварков [udd], его энергия равна 939,565378(21) МэВ, что составляет 1838,683658 электронных единиц энергии. Время жизни свободного нейтрона составляет 885,7(8) с, после чего согласно реакции он превращается в протон ${}_0^1n \to {}_1^1p + e^- + \bar{\nu}_e$. Электрон с поглощением нейтрино встраивается в протон и нейтрализует отрицательный заряд протона. Согласно современным представлениям нейтрон является одним из энергетических состояний протона. Нейтрон образуется из протона при поглощении электрона и нейтрино, имеет нейтральный заряд и также кратен α. При этом видоизмененный электрон располагается на расстоянии двух волновых радиусов протона с противоположной стороны от трех кварков протона (см. рис. 14).

Энергия фотона, излучаемая атомом водорода, пропорциональна α:

$$E_ф = -m_e q^4/8\varepsilon_0^2 h^2 n = -m_e c_0^2 (1/2\alpha n)^2. \quad (19)$$

Кинетическая энергия электрона на первой боровской орбите, излучаемая атомом водорода, пропорциональна α

$$E_{a1} = \mu_0 q^2 c_0^2/4\pi r_{m_a} (1/2\alpha n_a)^2 = m_e c_0^2 (1/2\alpha n_a)^2, \quad (20)$$

где n_a — ценное положительное число.

Для многоэлектронных атомов кинетическая энергия электронов атомных орбиталей

$$E_{a_m} = \mu_0 q^2 c_0^2/4\pi r_{m_a} (Z/2\alpha n)^2 = m_e c_0^2 (Z/2\alpha n_z)^2, \quad (21)$$

где n_a, n_z — целые положительные числа;

Z — порядковый номер ядра.

Движение электронов по эквипотенциальным поверхностям атомов происходит без рассеяния энергии и подобно потокам частиц, движущимся по эквипотенциальным поверхностям без диссипации. Излучение или поглощение фотонов происходит при переходе частиц с орбиты на орбиту (одного уровня энергии на другой) с изменением состояния частицы — фазовым переходом через критическую величину (энергетический потенциальный барьер). Строение электронных оболочек атомов определяет строение эквипотенциальных поверхностей в конденсированных средах. Тем самым получена группа частиц, необходимая для создания Периодической системы элементов. Периодическая система элементов является системой подобных элементов, в которой критерием подобия также является постоянная Зоммерфельда (или постоянная тонкой структуры) α. Подобие строения электронных оболочек атомов хорошо коррелируется со свойствами конфигураций элементов. В основе подобия явлений переноса вещества без диссипации лежит подобие элементарных частиц (лептонов, мезонов и барионов). Из подобия частиц следует подобие элементов Периодической системы и, соответственно, подобие таких явлений, как сверхнизкое трение, сверхпроводимость, сверхтекучесть, рост покрытий в вакууме, при определенных условиях и термоэлектричество.

Критериями подобия элементарных частиц и атомов (элементов) Периодической системы следует считать: постоянную тонкой структуры α^{-1} — отношение $r_{Д_e}/r_{m_e}$ ($r_{Д_e}$ — комптоновский радиус электрона; r_{m_e} — длина томсоновского рассеяния); спин S, равный nh (h — постоянная Планка; n — коэффициент кратности).

Отношение радиуса первой боровской орбиты электрона в атоме водорода (комптоновского радиуса атома водорода $r_{Да}$) к радиусу дебройлевской волны фотона $r_{Дф}$, излученного с этой орбиты электроном, равно α.

Рассмотренные элементарные частицы подобны друг другу.

Постоянная тонкой структуры α является критерием подобия не только для элементарных частиц, но и для атомов Периодической системы.

Создание потоков без диссипации с элементами подобия в конденсированных средах (сверхнизкое трение, сверхпроводимость, сверхтекучесть)

Эквипотенциальные поверхности — понятие, применимое к любому потенциальному векторному полю, например, к электрическим или гравитационным полям. Движение потоков частиц без диссипации энергии осуществляется по изоэнергетическим пространствам в диссипативной системе. Эквипотенциальные поверхности, вдоль которых возможно движение потоков частиц без диссипации энергии, могут существовать в следующих случаях:

— в виде изоэнергетических уровней выше уровня Ферми и ниже зоны проводимости, где образуется соответствующая энергетическая щель;

— в случае наличия ван-дер-ваальсовых плоскостей (0001) с изоэнергетическими уровнями в слоистом веществе (типа дихалькогенидов, диборидов).

Рассмотрим вопрос создания конденсированного состояния вещества как диссипативной системы, в которой возникают потоки частиц, движущихся без рассеяния энергии. Эквипотенциальные поверхности орбит в атомах и движение электронов по таким поверхностям без рассеяния энергии подобны потокам частиц, движущимся по эквипотенциальным поверхностям без диссипации. Периодическая система состоит из подобных элементов (атомов с разным числом электронных орбит), формирующихся из электронов и протонов, размещенных в среде по определенным правилам. В атоме водорода электрон движется по эквипотенциальной поверхности квантовой орбиты (уровня) без рассеяния энергии. Орбита имеет кривизну, отношение которой к радиусу комптоновской длины электрона пропорциональны постоянной тонкой структуры α. Однако с помощью Периодической системы возможно создание конденсированного твердого тела с достаточно гладкими сингулярными поверхностями (например, плоскостями (0001)) слоистого вещества типа дихалькогенида.

В случае сверхпроводимости движение частиц без диссипации проявляется при возникновении пар Купера с энергией выше потенциального барьера поверхности Ферми, что создает возможность движения по поверхности Ферми без диссипации энергии при соответствующих температурах. Электроны куперовской пары движутся в двух параллельных пространствах Ван-дер-Ваальса между пакетами слоистого вещества. При нормальных условиях в слоистых кристаллических структурах с высокой анизотропией свойств движущаяся куперовская пара может существовать достаточно долго. Такая стабильность частиц и отсутствие теплового рассеяния (в виде излучения фотонов) обеспечиваются геометрическим построением частиц пропорционально постоянной тонкой структуры α [2—9]. Уровень энергии частицы в щели определяется 1/2 разницы между энергией Ферми и нижним уровнем зоны проводимости:

$$1/2\ E_g = E_f - E_{con}. \qquad (22)$$

Учитывая формулы (11—14) и момент импульса для уровня Ферми при возникновении куперовской пары, соотношение 1/2 E_g и E_f кратно постоянной тонкой структуры α:

$$E_g/2E_f = n_f\alpha, \qquad (23)$$

где n_f — коэффициент пропорциональности.

Отношение импульсов Ферми P_f и частицы в щели

$$P_f = hk_f/2\pi = m_e v_f \lambda_{де} k_g/2\pi = m_e v_f/2\pi(n\alpha)^{-1}, \qquad (24)$$

где k_f — волновое число уровня Ферми;

k_g — волновое число уровня щели;

v_f — скорость электрона на уровне Ферми.

Тогда

$$2\pi P_f/n_f m_e v_f = \alpha. \qquad (25)$$

Следовательно, постоянная тонкой структуры α является критерием подобия для потоков частиц в конденсированных средах.

Сверхтекучее и сверхпроводящее состояния вещества, которые можно рассматривать как сверхтекучесть электронного газа из куперовских пар, являются подобными явлениями, как и сверхнизкое трение, определяемое подвижностью частиц двумерной мигрирующей фазы. Следовательно, в случае сверхпроводимости и сверхтекучести применяемые для сверхнизкого трения теории существования двух фаз также можно представить как соотношение обычной и сверхпроводящей (или сверхтекучей) компонент. Соответствующий фазовый переход с изменением состояния

частиц можно рассматривать как преодоление распределенных по энергии частиц определенной критической величины (преодоление потенциального барьера, критической температуры). В основе атомно-кластерной модели роста покрытий лежит возникновение фрактальных броуновских поверхностей под воздействием тепловых потоков от частиц осаждаемого вещества и тепла от нагревателя с формированием перекрестного потока мигрирующих частиц, движущегося преимущественно по эквипотенциальным поверхностям (0001) растущего покрытия [2—9]. В результате геометрического отбора преимущественный рост получают кристаллографические плоскости с индексами $[10\bar{1}0]$ и $[11\bar{2}0]$, имеющие наиболее высокую поверхностную энергию. При этом плоскости (0001) растущих кристаллов, где действуют слабые силы Ван-дер-Ваальса, обеспечивают непрерывный приток мигрирующих атомов в область кристаллизации. Рост фрактальных броуновских поверхностей обоснован принципом минимума диссипации — преимущественным движением осаждаемых частиц по эквипотенциальным поверхностям с минимальной диссипацией или в пределе ее отсутствия.

В случае процесса трения движение без диссипации энергии означает отсутствие сил сопротивления движению между частицей (атомом, молекулой, кластером) и плоскостью (0001), по которой движется с тепловой энергией частица, когда значения коэффициента трения выходят за пределы чувствительности приборов. Затраты энергии возникают при ориентации плоскостями (0001) дихалькогенида параллельно поверхности трения в процессе приработки, сила взаимодействия между частицами и плоскостями (0001) в процессе трения исчезала. Кроме того, наличие легирующих монослоев частиц на поверхностях трения увеличивает расстояние между плоскостями (0001) и большего снижения энергии взаимодействия между слоями.

Реальные физические процессы — электрический ток, движение жидкости, рост кристаллов при ионно-плазменном нанесении покрытий — являются неравновесными диссипационными процессами либо стационарными потоками вещества вдали от равновесия. Однако в таких неравновесных процессах возможно создание стационарных потоков вещества, движущихся без диссипации энергии. Возможность движения без диссипационного переноса вещества может быть реализована по расположенным выше критического уровня фазового перехода эквипотенциальным поверхностям конденсированной среды, что объясняет явления сверхнизкого трения, сверхпроводимости, сверхтекучести, фрактальный рост анизотропных кристаллов в вакууме.

Механизм антифрикционного действия, объясняющий возникновение эффекта сверхнизкого трения твердых слоистых материалов на основе дихалькогенидов и определяющий высокие триботехнические свойства покрытий в процессе трения, обоснован легкостью раскалывания кристаллов по плоскостям (0001) пакетов легированного дихалькогенида, где действуют слабые взаимодействия типа ван-дер-ваальсовских, не связанные с обменом или обобществлением электронов, и допускающие скольжение частиц по плоскостям (0001) таких пакетов без диссипации энергии.

Высокотемпературный перенос частиц без диссипации (теплового рассеяния) возможен вдоль эквипотенциальных поверхностей (0001) слоистых анизотропных соединений, при наличии в слоистой структуре твердого тела пространств Ван-дер-Ваальса. Отличительной особенностью слоистого твердого тела является наличие пространств Ван-дер-Ваальса, в которых реализуется взаимодействие посредством дальнодействующих дисперсионных ван-дер-ваальсовых сил и нет свободных валентных электронов, способных образовывать сильные обменные взаимодействия. Тем самым возникает возможность перемещения частиц без диссипации (рассеяния) энергии по эквипотенциальным поверхностям. Диссипативные процессы 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-механи-

ческих характеристик, не наблюдаемых у других веществ [1—9, 14, 15, 19, 20]. Созданы композиционные покрытия переменного по толщине состава от износостойкого подслоя до внешнего легированного антифрикционного слоя, обладающие сверхнизким трением и высокими защитными износостойкими свойствами [1—9, 19, 20].

Выводы

Установлено подобие явлений (сверхнизкое трение, сверхпроводимость, сверхтекучесть, рост покрытий в вакууме, термоэлектричество) и определены критерии подобия как соотношение количества двух фаз (потоков частиц) с различными свойствами.

Сверхнизкое трение, сверхпроводимость и сверхтекучесть в предельном случае состоят из одной фазы, частицы которой движутся вдоль эквипотенциальных поверхностей без диссипации энергии.

Возникновение без диссипационного переноса частиц происходит в виде фазового перехода при критической величине характерного параметра (преодоление энергетического потенциального барьера). Осуществление такого движения вещества возможно по эквипотенциальным поверхностям слоистого твердого тела с особыми изоэнергетическими уровнями выше уровня Ферми и ниже зоны проводимости, где образуется соответствующая энергетическая щель.

Обнаружено явление переноса частиц без диссипации энергии вдоль эквипотенциальных поверхностей с постоянными энергетическими барьерами, определяемых формой и структурой кристаллических поверхностей в диссипативных системах.

Из подобия элементарных частиц следует подобие элементов Периодической системы и подобие таких явлений, как сверхнизкое трение, сверхпроводимость, сверхтекучесть, рост покрытий в вакууме, термоэлектричество.

Постоянная тонкой структуры α является критерием подобия для элементарных частиц, элементов Периодической системы, потоков частиц в конденсированных средах.

Библиографический список

1. **Ноженков М.В.** О низком трении твердых тел // Трение и износ. 1987. Т. 8. № 3. С. 459—466.
2. **Ноженков М.В.** Влияние структуры на сверхнизкое трение покрытий, нанесенных ионным распылением // Поверхность. 2015. № 5 С. 100—112.
3. **Ноженков М.В.** Рост фрактальной структуры при нанесении вакуумных ионно-плазменных покрытий // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 7. С. 11—28.
4. **Ноженков М.В.** Структура и свойства вакуумных ионно-плазменных покрытий // Поверхность. 2014. № 1. С. 54—63.
5. **Nozhenkov M.V.** The ultra-low friction of layer structures // Mechanical Engineering Research. 2013. Vol. 3. N 2. P. 73—90.
6. **Nozhenkov M.V.** Superlow interaction in layered structures // Global Journal of Researches In Engineering. 2014. Vol. 14-A. Issue 2. P. 55—61.
7. **Ноженков М.В.** О слабых взаимодействиях частиц в твердых телах // Наноинженерия. 2012. № 3 (9). С. 41—47.
8. **Ноженков М.В.** Кристаллическая структура и свойства покрытий, наносимых вакуумными ионно-плазменными методами // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 9. С. 38—48.
9. **Ноженков М.В.** Бездиссипативные потоки вещества в конденсированных средах // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 2. С. 20—31.
10. **Куни Ф.М., Щекин А.К., Новожилова Т.Ю.** Соотношения взаимности Онзагера в неравновесной термодинамике // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2005. Сер. 4. Вып. 3. С. 125—129.
11. **Пригожин И., Кондепуди Д.** Современная термодинамика. М.: Мир, 2002. 461 с.
12. **Каршенбойм С.Г.** Фундаментальные физические константы: роль в физике и метрологии и рекомендованные значения // УФН. 2005. Т. 175. С. 271—298.
13. **Каршенбойм С.Г.** Прогресс в уточнении фундаментальных физических констант: рекомендованные значения КОДАТА 2010 // УФН. 2013. Т. 183. С. 935—968.
14. **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.
15. **Булаевский Л.Н.** Сверхпроводимость и электронные свойства слоистых соединений // УФН. 1975. Т. 116. С. 449.
16. **Веников В.А.** Теория подобия и моделирования. М.: Высшая школа, 1976. 479 с.
17. **Александров П.С.** Введение в гомологическую теорию размерности и общую комбинаторную топологию. М.: Наука, 1975. 367 с.
18. **Веников В.А., Веников Г.В.** Теория подобия и моделирования. М.: Высшая школа, 1984. 439 с.
19. **Ноженков М.В.** Влияние структуры на сверхнизкое трение ионно-плазменных покрытий // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 1. С. 22—33.
20. **Ноженков М.В.** Возникновения потоков подобных частиц без диссипации энергии // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 12. С. 11—28.

УДК 621.3.049.76, 544.034.23

Ю.С. Боброва, **М. Андроник**, **В.В. Жуков**, *канд. тех. наук*
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана),
Р.Ш. Тахаутдинов *(Акционерное общество "Концерн радиостроения "Вега", Москва),*
С.П. Бычков *(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)*
E-mail: zhukov-vv@yandex.ru

Низкотемпературное термокомпрессионное сращивание меди в технологии изготовления высокоплотных микросистем

Представлены результаты анализа способов монтажа бескорпусных кристаллов на коммутационные платы для функционирования в ВЧ- или СВЧ-диапазоне. Предложен вариант получения 3D-микросистем из многоуровневых коммутационных плат на керамическом и полупроводниковом основании, объединенных в единую электрическую цепь посредством низкотемпературного термокомпрессионного сращивания медных выводов. Рассмотрены основные процессы, протекающие при термокомпрессионном сращивании медных контактов за счет взаимной диффузии. Представлены результаты экспериментов по низкотемпературному термокомпрессионному сращиванию меди.

The paper gives the results of the analysis methods to mount chips on the HF and SHF circuit boards. The new type of 3D microsystem creation from ceramic or semiconductor multilayer interconnection boards by low temperature thermocompression bonding of copper pads is suggested. The main processes involved in the thermocompression bonding of copper pads due to interdiffusion are considered and the results of the experiments of thermocompression bonding of copper pads are shown.

Ключевые слова: монтаж кристаллов на коммутационную плату, многоуровневые тонкопленочные коммутационные платы, низкотемпературное компрессионное сращивание, прямое сращивание бескорпусных кристаллов, 3D-интеграция, 3D-микросистема.

Keywords: die bonding, stacking of the ceramic circuit boards, low temperature compression bonding, copper pads, direct bonding, chip assembly, 3D integrated circuits, 3D microsystems.

Введение

Повышение частоты функционирования радиоэлектронного устройства (быстродействие в гигагерцовом диапазоне) приводит к повышению скорости изменения токов и напряжений в его цепях. Для достижения быстродействия такого устройства нужен принципиально иной подход на этапах его проектирования и изготовления, поскольку необходимо обеспечение электромагнитной совместимости, минимизация помех и задержек распространения сигнала, а также соблюдение требования целостности сигнала, что не актуально в случае низкочастотных устройств [1].

На частотах функционирования прибора в ВЧ- и СВЧ-диапазоне паразитные явления в основном связаны с индуктивностью. Уменьшение длины соединительных проводников — один из путей ее снижения [2].

Степень дезинтеграции можно характеризовать соотношением площадей кристалла S_{kr}, корпуса S_{ko} и монтажного поля на коммутационной плате S_m (рис. 1). Современные типы корпусов позволяют снизить как занимаемую интегральной схемой (ИС) площадь, так и длины межсоединений внутри корпуса, предполагая степень дезинтеграции от 6 до 52. В случае когда кристалл предполагает монтаж без корпуса, степень дезинтеграции существенно снижена и находится в интервале

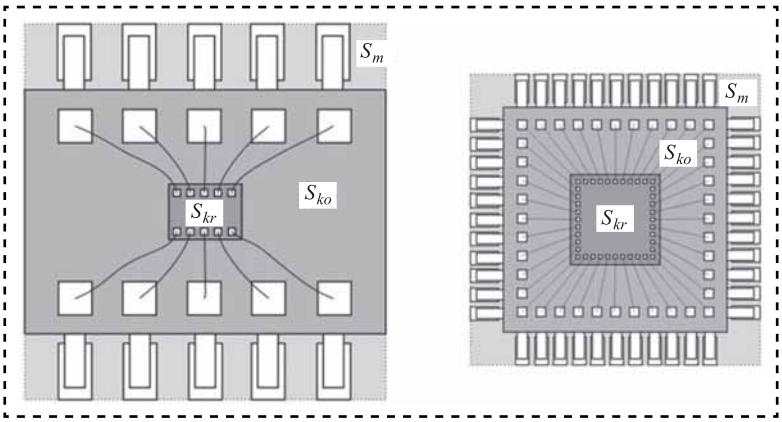


Рис. 1. Площадь, занимаемая электронным компонентом на плате

от 1,5 до 2 (характерно для монтажа бескорпусных кристаллов ИС методами перевернутого кристалла (Flip-Chip) и разваркой выводов микропроволокой (Wire-Bonding)).

Способы снижения влияния паразитных явлений на электрические характеристики радиоэлектронных узлов:

1) снижение геометрических параметров связей ИС с коммутационной платой за счет монтажа бескорпусных кристаллов ИС;

2) снижение длины и оптимизация формы межсоединений кристаллов ИС и коммутационной платы.

Монтаж перевернутого кристалла ИС, а также разварка выводов кристалла ИС микропроволокой (рис. 2) во многом решают проблемы, возникающие по причине наличия у ИС корпуса (паразитные емкость и большая индуктивность, низкий теплоотвод, большие габариты в целом и т.д.). Эти методы не устраняют проблем, вызываемых наличием операций пайки и разварки (низкая надежность, сложно моделируемые процессы паразитного влияния индуктивности и т.д.). Прямое сращивание бескорпусных кристаллов с межслойными переходами, выполненными по TSV-технологии (Through Silicon Vias) может решить эти проблемы [4] (рис. 3).

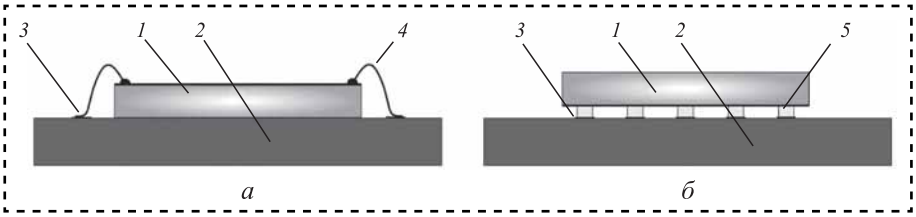


Рис. 2. Способы монтажа некорпусированного кристалла на плату:
а — разварка проволокой; *б* — перевернутый кристалл; *1* — кристалл; *2* — коммутационная плата; *3* — контактная площадка; *4* — проволока; *5* — медные столбики

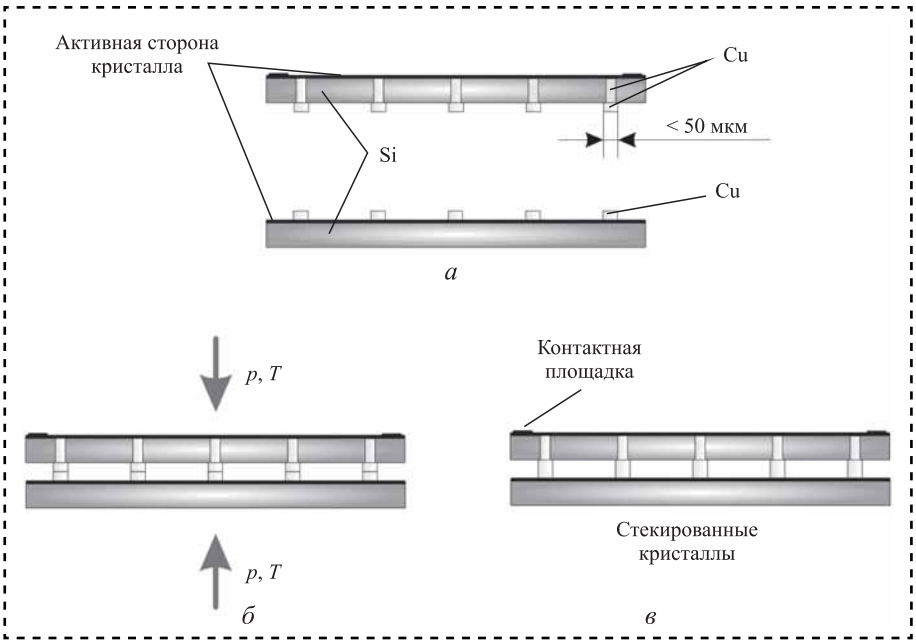


Рис. 3. Схематический маршрут стекирования кристаллов ИС:
а — стекируемые элементы; *б* — термокомпрессионное сращивание выводов кристаллов; *в* — система из двух стекированных кристаллов

Используем похожий процесс, но в ином масштабе (максимальный размер контактных элементов 100...250 мкм), для получения электромеханического соединения кристаллов с коммутационной платой, а также для стекирования микрокоммутационных плат на различных основаниях (включая керамические, кремниевые, композиционные и т.д.) между собой.

На рис. 4 рассмотрена технологическая схема формирования электромеханического соединения двух тонкопленочных коммутационных плат посредством низкотемпературного термокомпрессионного

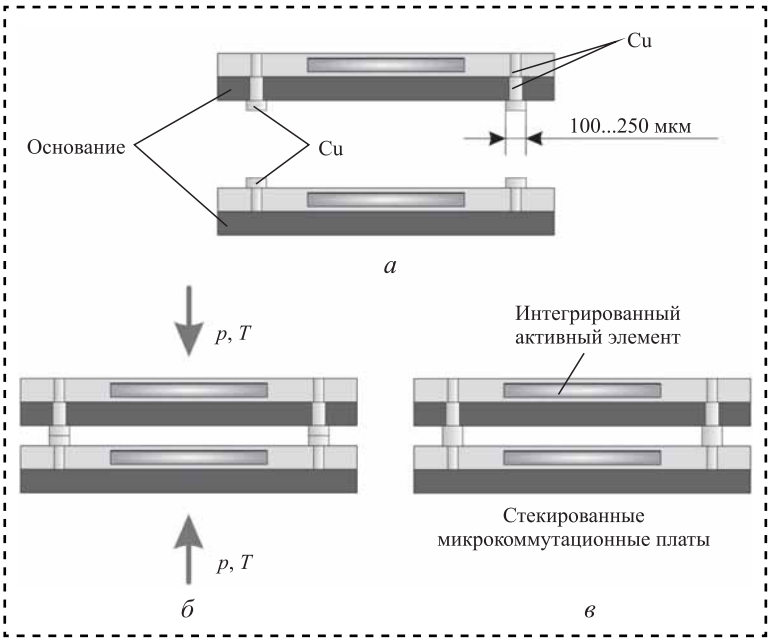


Рис. 4. Схематический маршрут низкотемпературного термокомпрессионного сращивания медных выводов тонкопленочных коммутационных плат:
а — стекируемые элементы; *б* — термокомпрессионное сращивание выводов коммутационных плат; *в* — система из двух стекированных микрокоммутационных плат

сращивания (Low Temperature Thermocompression Bonding).

Способ термокомпрессионного сращивания заключается в приложении давления к приведенным в соприкосновение ювенильным поверхностям контактных площадок (КП) платы и выводов кристалла или КП другой платы при температуре до 400 °С. Ограничение по верхнему пределу температуры накладывают конструкционные материалы объединяемых элементов, особенно согласованность коэффициентов термических линейных расширений материалов. Ограничение по нижнему пределу температуры накладывает скорость протекания взаимной диффузии медных контактов и, как следствие, длительность процесса в общем.

Физико-химические основы термокомпрессионного сращивания

Способ термокомпрессионного сращивания медных контактов является разновидностью сварки давлением, физико-химические процессы которой могут быть описаны законами твердофазного взаимодействия. При плотном контакте двух медных структур в месте соединения происходит взаимная диффузия частиц, приводящая к устранению границ раздела структур и взаимному прорастанию кристаллов одной структуры в объем другой структуры. По своей сути это процесс контактной сварки с применением нагрева и давления, являющейся разновидностью стыковой сварки, с той разницей, что нагрев контактирующих поверхностей происходит через диэлектрическое основание плат и/или кристаллов.

Температура при диффузионной сварке однородных металлов составляет 0,5...0,7 от температуры плавления металла [5]. В случае термокомпрессионного сращивания медные контактные площадки платы и выводы кристаллов в процессе соединения находятся в твердом состоянии, продолжительное время тесно контактируя друг с другом при температурах, которые не превышают 0,3 от температуры плавления меди. В случае объединения кристаллов в единый модуль посредством термокомпрессионного сращивания медных контактов температуры могут достигать 0,5 от температуры плавления меди, поскольку материалы, используемые при изготовлении кристаллов по TSV-технологии, способны выдерживать подобную термонагрузку.

Основное требование, выдвигаемое к соединениям коммутационных плат или коммутационных плат с кристаллами, заключается в том, что электрическое сопротивление контакта должно быть минимальным. Для контакта с площадью сечения 50 × 50 мкм и высотой 20 мкм сопротивление не должно превышать $1{,}4 \cdot 10^{-4}$ Ом (ГОСТ Р 53429—2009). Это означает, что необходимо обеспечить объемное прорастание кристаллов одного медного контакта в другой с минимальным количеством примесей и растворенных газов вдоль границ зерен.

Чем более мелкокристаллической будет медь, тем более протяженными будут границы зерен, что повлияет на скорость протекания диффузии, поскольку при температурах, не достигающих 0,8 от температуры плавления

металла, механизм диффузии в большей мере развивается по дислокациям, протяженным дефектам, а также вдоль границ зерен. Размер зерен, полученных при термокомпрессионном сращивании медных контактов двух кристаллов, при приложении силы 4000 Н, температуры 300 °С в течение 1 ч и последующего отжига в атмосфере N_2 (0,001 Торр) при температуре 400 °С в течение 1 ч составляет от 300 до 500 нм [6]. Можно сделать предположение о том, что для области соединения медных контактов микрокоммутационных плат размер зерен меди следует выдерживать в пределах 500 нм. Мелкозернистая структура менее подвержена хрупкому разрушению, что важно при вибро- и ударных нагрузках, которым подвергаются приборы специального назначения на базе многокристальных модулей во время эксплуатации.

Границы зерен наряду с внешней поверхностью являются основным поставщиком вакансий. Высокая температура и интенсивная взаимная диффузия могут привести к образованию пустот в зоне соединения [6, 7].

Дислокации в медных контактах при температуре 300 °С со временем в результате рекристаллизации металла и увеличения размеров зерен сливаются в пустоты, ослабляющие надежность соединения и ухудшающие его электрические параметры (рис. 5). Для предотвращения увеличения размеров зерен и объединения дислокаций в объемные пустоты необходимы более низкие температуры при термокомпрессионном сращивании. Это приведет к замедлению процесса, а качество контактирующих поверхностей и специальная атмосфера, в которой будет осуществляться твердофазное взаимодействие медных контактов, станут главными факторами процесса низкотемпературного термокомпрессионного сращивания.

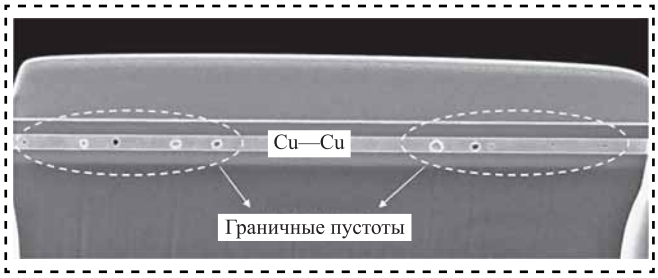


Рис. 5. Пустоты в межсоединении Cu—Cu [6]

Высокая шероховатость поверхности — также источник возникновения пустот. Для получения приемлемой шероховатости поверхностей сращиваемых контактов может быть использовано химическое или химико-механическое полирование. Для химического полирования меди применяют растворы на основе неорганических кислот [8]. Неорганические кислоты (соляная, серная, азотная кислоты) в то же время эффективно удаляют оксиды меди, тем самым активируя поверхности перед приведением медных контактов в соприкосновение [9].

Напыленная магнетронным методом тонкая медная пленка, находясь в атмосфере воздуха на протяжении 48 ч окисляется [10]. Выявлено формирование двойного слоя: внешний слой CuO толщиной 1,3 нм и внутренний слой Cu_2O толщиной 2,0 нм. При таких толщинах оксидов процесс взаимной диффузии медных контактов при температурах, не превышающих 0,3 от температуры плавления меди, не позволит получить электромеханическое соединение с требуемыми параметрами. Слои оксидов должны быть удалены [9], а непосредственно перед/во время процесса термокомпрессионного сращивания необходимо активировать медные контактирующие поверхности, восстановив медь из атомарных внешних слоев CuO.

Активировать контактирующие медные поверхности можно посредством органических кислот. Эти кислоты разлагаются при повышенных температурах, и продукты разложения реагируют с оксидами меди, восстанавливая медь и образуя летучие соединения. Так, нестабилизированная добавлением воды метановая кислота (HCOOH) медленно разлагается на CO и H_2O при нормальных условиях. При повышении температуры происходит интенсификация процесса разложения, который идет по двум основным направлениям [11]:

$$HCOOH \rightarrow (t)\ CO\uparrow + H_2O\ (пар)\uparrow;$$
$$HCOOH \rightarrow (t)\ CO_2\uparrow + H_2\uparrow.$$

При температурах 220...500 °С продукты разложения кислоты взаимодействуют с оксидами меди:

$$CuO + H_2 \rightarrow (t)\ Cu + H_2O\ (пар)\uparrow;$$
$$CuO + CO \rightarrow (t)\ Cu + CO_2\uparrow;$$
$$2CuO + C \rightarrow (t)\ 2Cu + CO_2\uparrow.$$

В результате осуществления одной из наиболее вероятных реакций (во многом зависит от температуры процесса) медь восстанавливается из атомарных слоев оксидов меди, создавая активную поверхность.

Технологические параметры термокомпрессионного сращивания

Среди факторов, влияющих на качество получаемого соединения медных контактов за счет термокомпрессионного сращивания, следует выделить шесть основных [5]:

— чистоту контактирующих поверхностей;

— шероховатость поверхностей, микрозазоры в зоне контактирования;

— активацию контактирующих поверхностей (отвод газообразных фаз после активации);

— температуру в зоне контактирования;

— давление сжатия;

— продолжительность процесса.

Способы обеспечения основных технологических параметров процесса и возможные дефекты перечислены в табл. 1.

Стекирование кристаллов ИС или их монтаж на коммутационные платы при изготовлении многоуровневых 3D-микросборок может осуществляться на оборудовании таких производителей, как Suss MicroTec (Германия), EV Group (Австрия), SET Corporation SA (Франция), Idonus Sarl (Швейцария), Mitsubishi Heavy Industries Machine Tool Co., Ltd (Япония), Applied Microengineering Ltd (Великобритания).

На данный момент полуавтоматическое оборудование этих производителей приобретается в России в основном для бондирования (сращивания) полупроводниковых пластин, однако в подобных установках может осуществляться и процесс сращивания металлических микроконтактов.

Реализация процесса низкотемпературного термокомпрессионного сращивания меди

В лаборатории "Микротехнологии" кафедры "Электронные технологии в машиностроении" (МТ11) МГТУ им. Н.Э. Баумана проведена пробная серия экспериментов для первичного ознакомления с реализацией процесса низко-

Таблица 1

Технологические параметры термокомпрессионного сращивания

Технологический параметр	Способ обеспечения параметра	Способ контроля	Возможные дефекты
Чистота поверхности	Химическая очистка, микротравление	Оптические приборы, бесконтактный гониометр	От частичного до полного отсутствия механического контакта
Шероховатость, микрозазоры	Точение, химико-механическое и химическое полирование	Профилограф, профилометр	От частичного до полного отсутствия электрического и/или механического контактов
Активация контактирующих поверхностей	Вакуум, пары кислот	Газонезависимый мембранно-емкостной датчик, масс-спектрометр	Окисление контактирующих поверхностей, отсутствие механического соединения
Температура	Регулирование мощности источника нагрева	Термопары	Изменение структуры в зоне соединения, остаточное напряжение, пустоты, плохой электрический контакт
Давление сжатия	Регулирование пневмосистемы	Индикаторы, датчики силы	Остаточное напряжение, деформация контактов, трещины в керамических и полупроводниковых подложках
Время процесса	Регулирование термокомпрессионного цикла	Таймер	Отсутствие механического контакта, изменение структуры в зоне соединения, избыточное электрическое сопротивление

температурного термокомпрессионного сращивания медных выводов тестовых заготовок.

Эксперимент проводили на прессе RMP 210 производства Bungard (Германия) [12] последовательно с интервалом в 4—6 недель посредством итерационного приближения. В выборе значений технологических параметров не был достигнут требуемый результат, а именно — неразъемное соединение медных контактов двух заготовок.

Основные геометрические параметры тестовых образцов, материалы, а также основные параметры процесса приведены в табл. 2.

По результатам проведенного эксперимента можно сделать следующие выводы:

1. Для химической очистки поверхностей крупных медных контактов необходима обработка в 10%-ном водном растворе серной кислоты не менее 5 мин. Для более глубокой химической очистки нужно использовать более

Таблица 2

Описание эксперимента по низкотемпературному термокомпрессионному сращиванию меди

Матералы, этапы и параметры эксперимента	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3
Материал нижней заготовки	Фольгированный стеклотекстолит FR4 18/0-0,5		
Материал верхней заготовки	FR4 18/0-0,5		
Площадь верхней/ нижней заготовки	2 дм^2		
Материал КП нижней заготовки	Медная фольга толщиной 18 мкм		
Материал КП верхней заготовки	Медная фольга толщиной 18 мкм	Медная фольга толщиной 18 мкм, покрытая гальванической медью толщиной 30 мкм	
Минимальный размер типовой КП нижней заготовки	Круглые КП диаметром 500 мкм	Медная поверхность без КП	
Минимальный размер типовой КП верхней заготовки	Круглые КП диаметром 250 мкм	Проводники шириной 300 и 400 мкм, замкнутые контуры из проводников шириной 300 и 400 мкм	Проводники шириной 250 и 300 мкм
Предварительная подготовка поверхности КП	1 мин в 10%-ном водном растворе H_2SO_4	2 мин в 10%-ном водном растворе H_2SO_4	5 мин в 10%-ном водном растворе H_2SO_4
Удаление оксидов с поверхности КП в процессе сращивания	Предварительное нанесение на КП HCOOH (85 %, хч)		
Способ нагрева заготовок	Загрузка заготовок в «холодный пресс». Нагрев совместно с плитами пресса от 20 до 175°С.	Загрузка заготовок в «горячий пресс». Предварительный нагрев плит пресса от 21 до 175°С.	
Скорость прогрева основания	Около 4,5 °С/мин	Около 15 °С/мин	
Прикладываемая сила	1 т/дм^2	2,5 т/дм^2	
Время процесса	6 ч		5 ч
Результат	Нет электромеханического соединения заготовок; поверхность контактных площадок сильно окислившаяся	Нет электромеханического соединения только между замкнутыми контурами и медной поверхностью нижней заготовки	Получено неразъемное соединение верхней и нижней заготовок. Отрыв по границе медная фольга—стеклотекстолит

концентрированный раствор серной и соляной кислот, который при добавлении хромового ангидрида может быть использован для химического полирования.

2. После всех "мокрых" процессов заготовку необходимо высушить, чтобы не вызывать относительно глубокого окисления медных контактов (в течение 1...4 ч при 75...85 °С в вакуумном сушильном шкафу).

3. При активации медных контактов метановая кислота должна подаваться на нагретые поверхности.

4. Во время активации медной поверхности необходимо обеспечить своевременный отвод продуктов разложения метановой кислоты и продуктов их реакции с оксидами меди из зоны контактирования: операция должна осуществляться в вакуумной камере; топология вокруг соединяемых медных контактов коммутационных плат не должна образовывать замкнутый контур.

Заключение

Впервые предложен способ использования низкотемпературного термокомпрессионного сращивания меди для получения высокоплотных многоуровневых коммутационных плат на керамических и полупроводниковых основаниях, которые не могут быть объединены в многослойную плату посредством традиционной операции прессования через соединительную стеклоткань, пропитанную неполимеризованной смолой. Данный процесс может быть реализован на оборудовании для производства многослойных печатных плат.

Библиографический список

1. **Кечиев Л.Н.** Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М.: ООО "Группа ИДТ", 2007. С. 14.
2. **Климачев И.И., Иовдальский В.А.** СВЧ ГИС. Основы технологии и конструирования. М.: Техносфера, 2006. С. 160—163.
3. **Медведев А.М.** Сборка и монтаж электронных устройств. М.: Техносфера, 2007. С. 17—18.
4. **Rao R. Tummala.** Introduction to System-on-Package (SOP). Miniaturization of the Entire System. New York: McGraw Hill. 2008. P. 121—149.
5. **Сварка** в машиностроении: справочник. В 4 т. / Г.А. Николаев и др. М.: Машиностроение, 1978. Т. 1 / под ред. Н.А. Ольшанского С. 401—411.
6. **Chuan S.T., Chandrakasan A., Reif R.** Progress in copper-based wafer bonding // Cambridge: MIT. P. 1—8.
7. **Chuan S.T.** Cu-to-Cu Thermo-compression Bonding and Its Recent Progress // International Workshop on 3D Design and Nanoelectronic System Technologies. Singapore: Nanyang Technological University. 2009. P. 16—17.
8. **Раствор** для химического полирования меди и ее сплавов: пат. 2299269 РФ: МПК[8] C23 F 3/06 / Ребров Е.Е., Нориков С.В., Балмасов А.В. и др., заявл. 21.10.2005, опубл. 20.05.2007.
9. **Habbache N., Alane N., Djerad S., Tifouti L.** Leaching of copper oxide with different acid solutions // Chemical Engineering Journal. N. 152. 2009.
10. **Keil P., Lützenkirchen-Hecht D., Frahm R.** Investigation of Room Temperature Oxidation of Cu in Air // Bergische Universität Wuppertal, Germany. 2007.
11. **Schmeißer M.** Decomposition of formic acid. Chemnitz University of Technology. 2011.
12. **Тахаутдинов Р.Ш.** Многослойные печатные платы. Первые шаги в освоении операции прессования // Технологии в электронной промышленности. 2010. № 3. С. 28—31.

УДК 519.85

Т.А. Крынина *(Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева)*
E-mail: kta1489@mail.ru

Разработка программного обеспечения для автоматизированного проектирования схвата робота-манипулятора

Представлено программное обеспечение для расчета и построения 3D-модели и чертежа схвата робота-манипулятора.

Software for the calculation and construction of 3D-model and the drawing gripper robot-manipulator is presented.

Ключевые слова: параметры заготовки, параметры схвата, расчет пружины, построение 3D-модели.

Keywords: options blanks, gripper settings, spring calculation, construction 3D-model.

Системы автоматизированного проектирования (САПР), базирующиеся на технологиях объемного параметрического моделирования, уже давно стали промышленным стандартом для проектирования конкурентоспособной продукции.

На фоне тенденции развития машиностроения наиболее актуально стоит задача разработки роботизированной техники, к элементам которой относятся схваты роботов. Схват — это зажимное механическое захватное устройство, приводимое в действие от пневмо- или гидроцилиндров, захватывание и удержание объекта в котором осуществляется за счет взаимного перемещения подвижных частей.

Одним из наиболее оптимальных способов разработки конструкции схватов является процесс моделирования, который позволяет исключить необходимость создания реальной конструкции схвата и проведения эксперимента по оценке его функционирования, что значительно снижает материальные затраты. Разработанные модели могут быть использованы для других видов схватов, работающих в аналогичных или отличных от данного варианта условиях.

При проектировании схвата определяют исходные параметры, выполняют расчет по выбранной методике, строят трехмерную модель и чертеж схвата. В первую очередь необходимо построить структурную схему проектирования схвата робота-манипулятора (рис. 1). На основе построенной структурной схе-

Рис. 1. Структурная схема

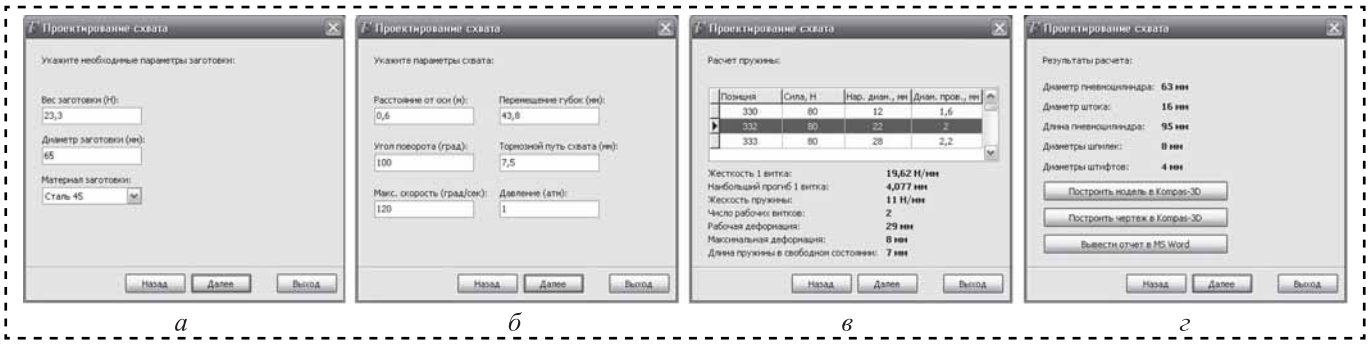


Рис. 2. Интерфейс программы:
а — параметры заготовки; *б* — параметры схвата; *в* — выбор пружины; *г* — результат программы

мы разрабатывают алгоритм программного обеспечения для автоматизированного проектирования схвата. Алгоритм расчета, представляет собой порядок вычисления конструктивных параметров схвата робота-манипулятора по определенной методике.

Алгоритм построения трехмерной модели подразумевает создание 3D-сборки схвата из составных частей (пневмоцилиндра) и остальных элементов (звеньев), получаемых с помощью различных операций: вытягивания, вращения, выдавливания и т.д. Алгоритм построения двухмерной модели включает в себя построение шаблона стандартного чертежа, главного вида, вида сверху, местных разрезов, текстовых надписей.

Исходные данные для расчета схвата:

- вес и диаметр заготовки;
- расстояние от оси вертикальной стойки робота до центра масс детали, удерживаемой в схвате;
- давление в системе.

Параметры, получаемые при расчете:

- сила нормального давления, развиваемая губками схвата;
- диаметры поршня и штока пневмоцилиндра;
- ход губок схвата;
- реакции в шарнирах для каждого из звеньев схвата;
- размеры звеньев схвата (ширина, длина);
- пределы прочности резьбы и штифта при срезе;
- предельная прочность при смятии, сжатии и изгибе звеньев схвата;
- диаметр штифта;
- массы пневмоцилиндра, каждого из звеньев, всей системы;
- предельная скорость губок;
- жесткость пружины;
- длина пружины;
- число витков в пружине;
- коэффициент надежности системы.

Разработано программное обеспечение в среде Borland Delphi с использованием инструментальных средств приложений (библиотек конструктивов, прикладных САПР) на базе системы КОМПАС (рис. 2).

Для начала расчета необходимо ввести необходимые параметры заготовки и выбрать материал (рис. 2, *а*). Далее указывают параметры, которым должен соответствовать проектируемый схват (рис. 2, *б*).

На этом этапе программа рассчитает необходимые параметры схвата, но для дальнейшего расчета ей необходимо выбрать тип пружины из предложенного списка (рис. 2, *в*).

Следующим этапом программа выдает результаты работы (рис. 2, *г*). Нажав на кнопку "Построить модель в Kompas-3D" пользователь получает 3D-модель схвата (рис. 3), при нажатии на кнопку "Построить модель в Kompas-2D",

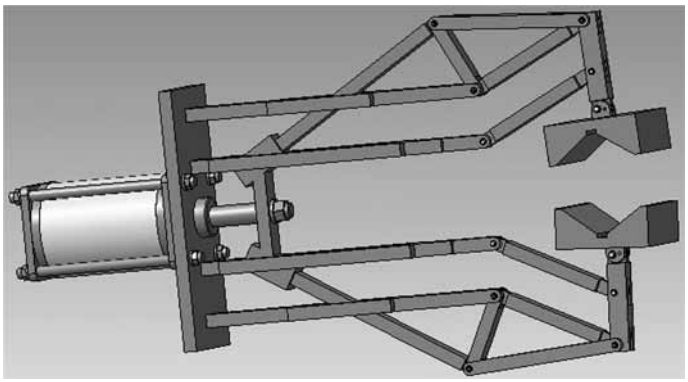


Рис. 3. 3D-модель схвата

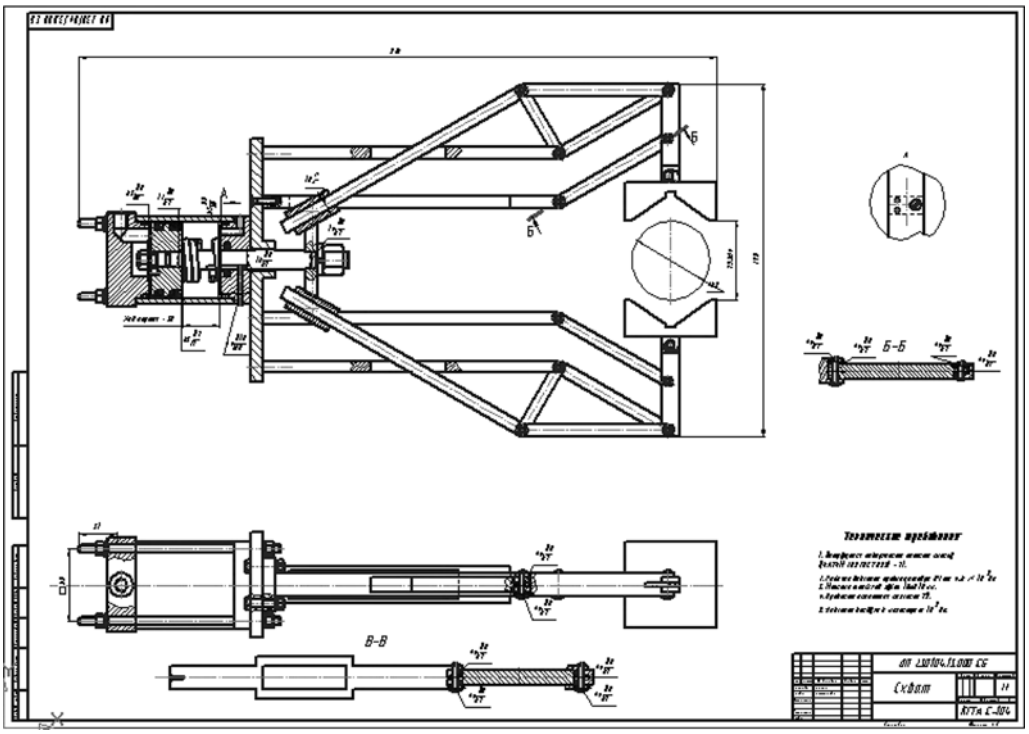


Рис. 4. Чертеж схвата

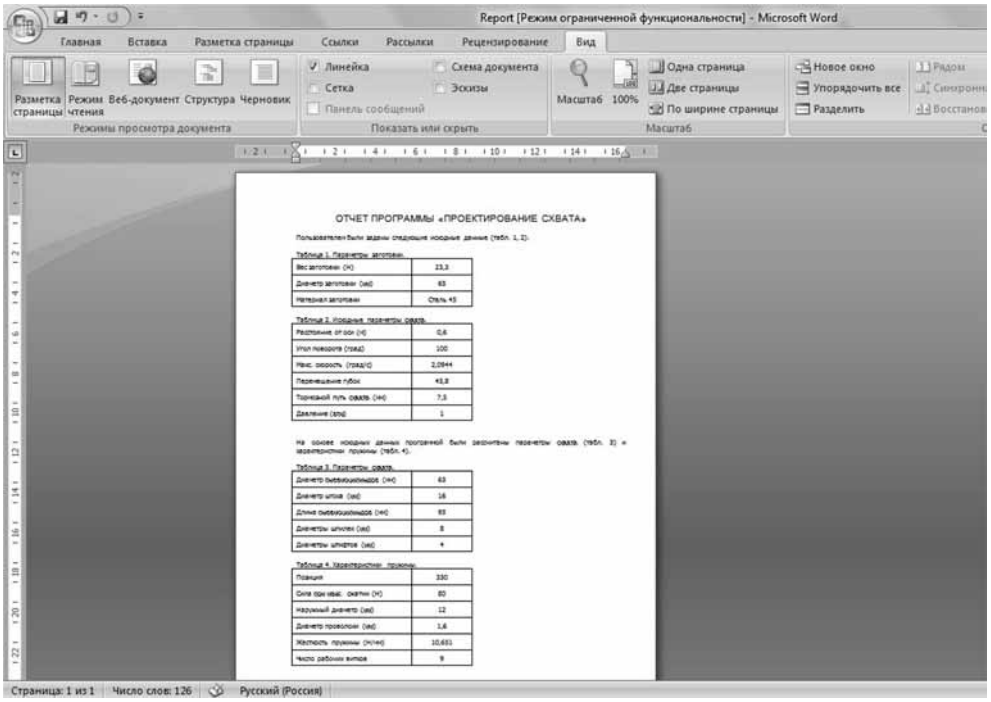


Рис. 5. Отчет в MS Word

программа выдает чертеж схвата (рис. 4), а на кнопку "Вывести отчет в MS Word" программа выведет отчет с подсчитанными параметрами (рис. 5).

Предлагаемое программное обеспечение позволяет выполнить расчет параметров проектируемого схвата робота-манипулятора и построить его трехмерную модель и чертеж.

УДК 621.838.222

М.П. Шишкарев, *д-р техн. наук*
(Донской государственный технический университет)
E-mail: shishkarevm@mail.ru

Влияние погрешностей изготовления и сборки адаптивных фрикционных муфт на их технические характеристики

Проведено уточнение расчетных зависимостей для определения предельного вращающего момента и коэффициента точности с учетом неравномерности расположения отжимных элементов управляющего устройства адаптивной фрикционной муфты в результате погрешностей изготовления и сборки.

Given the diversity of locations of elements of the nip control unit of the adaptive clutch as a result of the errors of manufacture and Assembly clarifies calculated dependences for determining the maximum torque and coefficient precision.

Ключевые слова: адаптивная фрикционная муфта, управляющее устройство, неравномерность, погрешность, коэффициент усиления.

Keywords: adaptive friction clutch, the control device, irregularity, the error, gain factor.

В исследованиях адаптивных фрикционных муфт (АФМ) всех классов считается, что на основные технические характеристики — нагрузочную способность и точность срабатывания — влияют только силовые и геометрические параметры элементов [1, 2]. Геометрические погрешности деталей, неизбежно возникающие в процессе их изготовления, при расчетах, проектировании и сборке АФМ во внимание не принимаются, а их влияние на технические характеристики муфт не учитывается.

Цель работы — изучение влияния погрешностей взаимного расположения гнезд управляющего устройства (УУ) на нагрузочную способность и точность срабатывания АФМ первого поколения.

На принципиальной схеме АФМ первого поколения (рис. 1) соосные одна другой полумуфты *1* и *2* связаны между собой пакетом фрикционных дисков *3* и *4*. Диски *3* соединены со ступицей нажимного диска *5* при помощи специального шлицевого соединения, применяемого в конструкциях предохранительных дисковых фрикционных муфт и обеспечивающего подвижность дисков в осевом направлении относительно ступицы [3]. Диски *4* связаны аналогичным способом с барабаном полумуфты *2*.

Нажимной диск *5* не имеет кинематической связи со ступицей полумуфты *1*. Незначительные силы трения, возникающие между ступицей полумуфты *1* и нажимным диском *5* в процессе работы под действием силы тяжести нажимного диска, далее не учитываются.

УУ муфты выполнено в виде чувствительных элементов — тел качения *6*, которые размещены в расположенных по окружности скошенных гнездах, выполненных на оппозитных торцовых поверхностях нажимного диска *5* и упорного диска *7*, жестко закрепленного на ступице полумуфты *1* (см. рис. 1, сечение А—А).

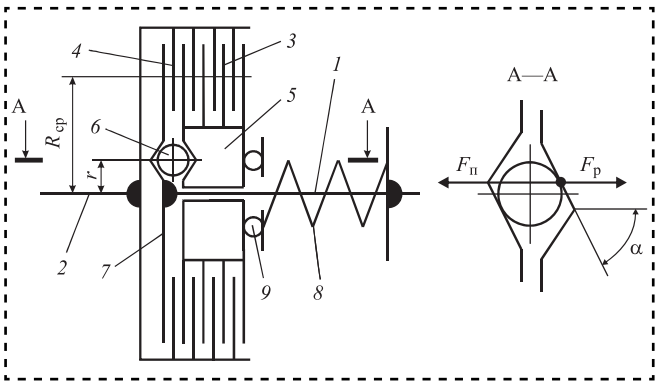


Рис. 1. Принципиальная схема АФМ первого поколения

Силовое замыкание пар трения *3* и *4* осуществляется при помощи пружины *8*, поставленной в муфту с предварительным натяжением, которое обеспечивает создание на поверхностях дисков *3* и *4* сил трения, достаточных для передачи необходимой нагрузки. Усилие пружины передается на нажимной диск и на пары трения через упорный подшипник *9*.

По исходному условию тела качения *6* располагаются в гнездах равномерно по окружности. В действительности, вследствие имеющихся неточностей изготовления и сборки муфты гнезда на нажимном диске *5* и на упорном диске *7* располагаются по окружности с отклонениями в радиальном и угловом направлениях. В связи с этим части полной распорной силы, каждая из которых приходится на тело качения, неодинаковы по величине, вследствие чего во время работы должен наступить перекос нажимного диска относительно ступицы полумуфты *1*. В результате этого возникают неучтенные в исследованиях силы трения в сочленении нажимного диска и ступицы полумуфты *1*, которые искажают картину распределения сил, действующих на нажимной диск *5* и на пары трения *3* и *4*.

В процессе работы АФМ из-за неравномерности распределения окружной нагрузки между телами качения УУ можно записать:

$$F_{\text{р}i} = \frac{k_i F_{\text{р}}}{n}, \qquad (1)$$

где $F_{\text{р}i}$ — действительная распорная (отжимная) сила, приходящаяся на i-е тело качения *6*;

$F_{\text{р}}$ — теоретическая распорная сила, приходящаяся на все тела качения (см. рис. 1, сечение А—А);

k_i — коэффициент неравномерности распределения распорной силы;

n — число тел качения УУ.

На схеме (рис. 2) показаны силы, действующие на ступицу нажимного диска в отношении одной пары тел контакта "тело качения УУ — ступица нажимного диска" и "ступица нажимного диска — ступица полумуфты *1*". Схема не учитывает неравномерность распределения нагрузки между телами качения УУ.

На ступицу нажимного диска действуют следующие силы:

— распорная (отжимная) сила $F_{\text{р}}/n$;

— нормальная сила F_{Ni} и сила трения $F_{\text{т}i}$ как результат действия на ступицу момента от силы $F_{\text{р}}/n$;

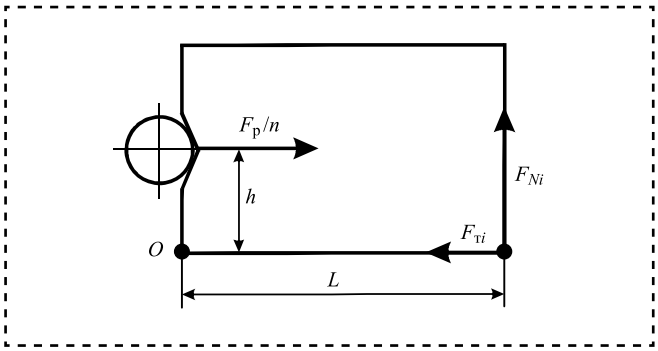


Рис. 2. Схема действия сил на ступицу нажимного диска

— тангенциальная (окружная) сила как результат действия на ступицу вращающего момента. Данная сила действует в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа, поэтому на схеме не показана. На схему действия сил в осевом направлении тангенциальная сила не влияет.

Согласно приведенной на рис. 2 схеме:

$$F_{\text{т}i} = f_1 F_{Ni}, \qquad (2)$$

$$-\frac{F_{\text{р}} h}{n} + F_{Ni} L = 0, \qquad (3)$$

где f_1 — коэффициент трения между ступицами полумуфты и нажимного диска;

h — плечо действия силы $F_{\text{р}}/n$, $h = (2r - D_{\text{о}})/2$;

r — радиус окружности, на которой расположены тела качения УУ;

$D_{\text{о}}$ — диаметр центрального (посадочного) отверстия нажимного диска;

L — длина опорной части ступицы нажимного диска.

Из уравнения (3) находим:

$$F_{Ni} = \frac{F_{\text{р}} h}{Ln}. \qquad (4)$$

Переходя к реальной схеме распределения нагрузки между телами качения и учитывая соотношение (1), получаем на основе выражения (4):

$$F_{Ni} = \frac{k_i F_{\text{р}} h}{Ln}. \qquad (5)$$

Для определения результирующей, т. е. геометрически суммируемой нормальной силы, действующей на правой (см. рис. 2) кромке ступицы нажимного диска *5*, воспользуемся вспомогательной схемой на рис. 3. На схеме относительно оси y показано распределение нормальных сил, действующих в трех точках (соответственно принятому в данном примере числу тел качения 6) правой кромки ступицы нажимного диска (см. рис. 2).

Уравнение равновесия нажимного диска в проекциях на ось y (см. рис. 3):

$$\sum F_{Ny} = F_{N1} - F_{N2}\cos\frac{\pi}{n} - F_{N3}\cos\pi\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{n}\right). \quad (6)$$

С учетом выражения (5) запишем уравнение (6) в следующем виде:

$$\sum F_{Ny} = \frac{F_{\text{р}}h}{Ln}\left[k_1 - k_2\cos\frac{\pi}{n} - k_3\cos\pi\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{n}\right)\right], \quad (7)$$

где k_1, k_2, k_3 — частные коэффициенты неравномерности распределения распорной силы на телах качения УУ.

Коэффициент неравномерности распределения распорной силы, действующей между телом качения и нажимным диском, определяется по формуле:

$$k_i = \frac{F_{\text{р}i}}{F_{\text{р}}}. \quad (8)$$

Очевидно, что

$$\sum_{i=1}^{n} k_i = k_1 + k_2 + \ldots + k_i = 1.$$

Суммарная сила трения, действующая на ступицу нажимного диска, равна

$$F_{\text{тр}} = \left|\sum N_i\right| f_1 = \frac{F_{\text{р}}hf_1}{Ln}\left|k_1 - k_2\cos\frac{\pi}{n} - k_3\sin\frac{\pi}{n}\right|. \quad (9)$$

Для АФМ первого поколения с дифференцированными парами трения распорная сила вычисляется по формуле:

$$F_{\text{р}1} = (z-1)F_{\text{п}}C\frac{f_i}{1+(z-1)Cf_i}, \quad (10)$$

где z — число пар поверхностей трения фрикционной группы;

$F_{\text{п}}$ — сила замыкания пар трения при помощи пружины или группы пружин;

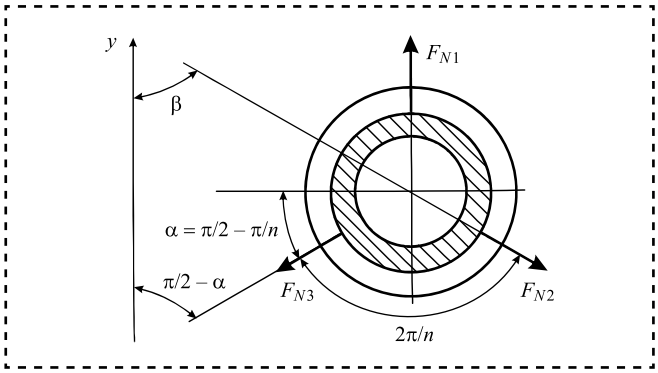


Рис. 3. Распределение нормальных сил на правой кромке ступицы нажимного диска

C — коэффициент усиления (КУ) обратной связи $C = \frac{R_{\text{ср}}}{r}\text{tg}\alpha$,

$R_{\text{ср}}$ — средний радиус поверхностей трения фрикционной группы (см. рис. 1);

α — угол давления чувствительных элементов УУ (см. рис. 1, сечение А—А);

r — радиус окружности, на которой расположены чувствительные элементы УУ (см. рис. 1);

f_i — произвольное значение коэффициента трения между парами фрикционной группы.

Запишем соотношение (9), с учетом выражения (10), в следующем виде:

$$F_{\text{тр}} = (z-1)F_{\text{п}}C\frac{f_i}{1+(z-1)Cf_i}\frac{f_1h}{Ln}\left|k_1 - k_2\cos\frac{\pi}{n} - k_3\sin\frac{\pi}{n}\right|. \quad (11)$$

С учетом действующей на ступицу нажимного диска силы трения $F_{\text{тр}}$, принимаемой во внимание при расчетах, фактическая (действительная) распорная сила, в соответствии с соотношением (11), составляет:

$$F'_{\text{р}} = F_{\text{р}1} - F_{\text{тр}} = (z-1)F_{\text{п}}C\frac{f_i}{1+(z-1)Cf_i}\times \\ \times\left(1 - \frac{f_1h}{Ln}\left|k_1 - k_2\cos\frac{\pi}{n} - k_3\sin\frac{\pi}{n}\right|\right). \quad (12)$$

Вращающий момент АФМ первого поколения вычисляется по соотношению [1]:

$$T_{\text{п}} = zR_{\text{ср}}f_i\left(F_{\text{п}} - F'_{\text{р}}\right). \quad (13)$$

С учетом формулы (12) запишем соотношение (13) в следующем виде:

$$T_{\text{п}} = zF_{\text{п}}R_{\text{ср}}f_i\left[1+(z-1)Cf_i\times \\ \times\left(\frac{hf_1}{Ln}\left|k_1 - k_2\cos\frac{\pi}{n} - k_3\sin\frac{\pi}{n}\right|\right)\right]\Big/\left[1+(z-1)Cf_i\right]. \quad (14)$$

Формула для вычисления вращающего момента АФМ без учета неравномерности распределения распорной силы между телами качения УУ имеет следующий вид [3]:

$$T_{\text{п}1} = zF_{\text{п}}R_{\text{ср}}\frac{f_i}{1+(z-1)Cf_i}. \quad (15)$$

Сопоставление соотношений (14) и (15) показывает, что $T_{\text{п}} > T_{\text{п}1}$ на величину, равную

$$\Delta T_{\text{п}} = zF_{\text{п}}R_{\text{ср}}f_i\left[(z-1)Cf_i\times \\ \times\left(\frac{hf_1}{Ln}\left|k_1 - k_2\cos\frac{\pi}{n} - k_3\sin\frac{\pi}{n}\right|\right)\right]\Big/\left[1+(z-1)Cf_i\right]. \quad (16)$$

Положительная величина $\Delta T_{\text{п}}$ является следствием уменьшения распорной силы, возникающей на телах качения УУ, за счет действия сил сопротивления — сил трения на кромке ступицы нажимного диска.

Уменьшение величины распорной силы означает увеличение силы прижатия друг к другу пар трения фрикционной группы за счет замыкающей пружины и, следовательно, вращающего момента, передаваемого муфтой.

Точность срабатывания АФМ оценивается коэффициентом точности, который в рассматриваемом случае, учитывая соотношение (14), вычисляется по формуле:

$$K_{\text{т}} = \frac{f_{\max}\left[1+(z-1)Cf_{\max}\left(\frac{hf_1}{Ln}\left|k_1 - k_2\cos\frac{\pi}{n} - k_3\sin\frac{\pi}{n}\right|\right)\right]\left[1+(z-1)Cf_{\min}\right]}{f_{\min}\left[1+(z-1)Cf_{\min}\left(\frac{hf_1}{Ln}\left|k_1 - k_2\cos\frac{\pi}{n} - k_3\sin\frac{\pi}{n}\right|\right)\right]\left[1+(z-1)Cf_{\max}\right]}. \quad (17)$$

Для оценки точности срабатывания АФМ с учетом трения между ступицей полумуфты *1* и ступицей нажимного диска *5* (см. рис. 1) по отношению к точности срабатывания муфты без учета трения воспользуемся поставленным выше условием о том, что сумма всех коэффициентов неравномерности распределения распорной силы между телами качения УУ равна единице.

Произведя в соотношении (14) замену в виде $k_1 = 1-(k_2+k_3)$, запишем следующее выражение:

$$T_{\text{п}} = zF_{\text{п}}R_{\text{ср}}f_i \times$$
$$\times \frac{1+(z-1)Cf_i\left[\frac{hf_1}{Ln}\left|1-k_2\left(1-\cos\frac{\pi}{n}\right)-k_3\left(1-\sin\frac{\pi}{n}\right)\right|\right]}{1+(z-1)Cf_i}. \quad (18)$$

Проанализируем числитель выражения (18). Поскольку каждый из коэффициентов k_2 и k_3 меньше единицы (см. выше), многочлен под знаком модуля также меньше единицы. Для сомножителя в квадратных скобках выражения (18) существует следующее ограничение: $\frac{hf_1}{Ln} < 1$, согласно схеме, изображенной на рис. 2.

Следовательно, величина, равная произведению

$$C\left[\frac{hf_1}{Ln}\left|1-k_2\left(1-\cos\frac{\pi}{n}\right)-k_3\left(1-\sin\frac{\pi}{n}\right)\right|\right], \quad (19)$$

меньше, чем *C*.

На основании этого, переходя от выражения (18) к соотношению (17), можно заключить, что так называемый "приведенный" КУ, равный многочлену (19), будет меньше, чем КУ, используемый в соотношении (17).

В АФМ первого поколения уменьшение *C* приводит к снижению точности срабатывания [4], поэтому, несмотря на то, что величина *C* во вторых квадратных скобках числителя и знаменателя соотношения (17) остается неизменной, точность срабатывания АФМ в рассматриваемом случае будет ниже.

Учет влияния неточностей изготовления деталей и сборки АФМ необходим для проведения расчетов с целью уточнения нагрузочной способности и точности срабатывания муфт.

Результаты исследования могут быть использованы при расчетах и проектировании АФМ любого поколения, имеющих в своем составе чувствительные элементы УУ обратной связи, при условии наличия информации о величинах коэффициентов k_i. Установление коэффициентов k_i, необходимых для конкретных расчетов, выходит за рамки настоящей работы и требует дополнительного исследования данного вопроса.

Выводы

1. Неравномерное расположение по окружности гнезд под тела качения УУ приводит в процессе работы АФМ к появлению сил трения на дальней от УУ кромке ступицы нажимного диска, которые препятствуют отжатию друг от друга пар трения фрикционной группы в процессе работы.

2. Для оценки неравномерности распределения распорной силы между телами качения УУ введен коэффициент, определяемый отношением частной распорной силы, приходящейся на одно тело качения, к совокупной распорной силе, вычисляемой с учетом неравномерности ее распределения. С учетом неравномерности распределения распорной силы между телами качения УУ реальный вращающий момент АФМ первого поколения увеличивается по сравнению с вращающим моментом АФМ без учета неравномерности распределения распорной силы, а точность срабатывания муфты — уменьшается.

Библиографический список

1. **Шишкарев М.П.** Адаптивные фрикционные муфты. Исследование, конструкции и расчет. Ростов-н/Д.: Изд-во РГАСХМ, 2002. 228 с.

2. **Шишкарев М.П.** Условие и возможность реализации высокой точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2008. № 5. С. 3—6.

3. **Шишкарев М.П.** Оптимизация коэффициента усиления адаптивных фрикционных муфт с дифференцированными парами трения // Тракторы и сельхозмашины. 2010. № 4. С. 36—39.

4. **Шишкарев М.П.** Точность срабатывания адаптивных фрикционных муфт // Вестник машиностроения. 2005. № 12. С. 17—18.

НИКОЛАЙ СЕМЕНОВИЧ ПЕНКИН

к 85-летию со дня рождения

21 июня 2016 г. исполняется 85 лет со дня рождения Николая Семеновича Пенкина. После окончания в 1959 г. Ленинградского института водного транспорта Николай Семенович работал в Управлении канала им. В.И. Ленина, где внедрил технологию повышения долговечности быстроизнашивающихся деталей. В дальнейшем продолжил научно-исследовательскую работу в Ленинградском институте водного транспорта (ЛИВТ), где провел исследования износостойкости различных полимерных материалов в потоке твердых частиц, выявил механизм и установил основные закономерности гидроабразивного изнашивания полимеров и эластомеров. В 1965 г. Н.С. Пенкин защитил кандидатскую диссертацию на эту тему.

В дальнейшем он сформировал новое направление — износостойкость гуммированных деталей машин на базе энергетического подхода к изнашиванию. Это научное направление он успешно разрабатывал и после переезда в г. Ставрополь, где Николай Семенович сначала заведовал кафедрой, а затем стал ректором Ставропольского политехнического института (ныне Северо-Кавказский государственный федеральный университет). В этот период при непосредственном участии и под руководством Н.С. Пенкина был выполнен ряд фундаментальных научно-исследовательских работ по изучению процесса изнашивания материалов и деталей машин в гидроабразивной и абразивной массе. В результате разработаны и внедрены на предприятиях горно-обогатительного комплекса гуммированный делитель потока, резиновая ячейковая футеровка шаровых мельниц, гуммированная трубопроводная арматура и др. Разработан качественно новый тип оборудования — износостойкие гуммированные спиральные классификаторы для обогащения руды. Классификаторы были запущены в серийное производство. За эту работу Н.С. Пенкин награжден бронзовой, серебряной и золотой медалями ВДНХ.

В 1979 г. он защитил докторскую диссертацию. Профессор Н.С. Пенкин сформулировал энергетическую концепцию контактного взаимодействия твердых частиц с эластичной поверхностью, раскрыл квазихрупкий механизм изнашивания эластичных материалов, разработал классификацию гуммированных деталей. Его перу принадлежат 4 монографии, более 200 различных публикаций в научных журналах. Он получил 47 авторских свидетельств и патентов.

Талантливый организатор и увлеченный человек Н.С. Пенкин создал научную школу по проблемам трения и износа высокоэластичных материалов. И сейчас, работая в должности старшего научного сотрудника, он полон энергии и новых идей.

Редакция журнала, ученики, коллеги и друзья сердечно поздравляют Николая Семеновича, желают творческих успехов и удачи во всех начинаниях.

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, факс: 8 (499) 268-48-97.
Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 11.04.2016. Подписано в печать 02.06.2016. 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.